N° d'enregistrement
au C.N.R.S. A0 9049

THESE DE DOCTORAT D'ETAT ES SCIENCES APPLIQUEES

présentée

A L'UNIVERSITE PARIS VI

PAR

Monsieur Jean BLOUET

pour obtenir
le grade de Docteur ès-sciences

Sujet de la Thèse : **CONTRIBUTION à L'ETUDE DE L'EVOLUTION INITIALE DE L'USURE DANS LE CAS DU FROTTEMENT DE CERTAINS METAUX**

Soutenue le 13 Novembre 1973

devant la Commission d'Examen

M.M. SIESTRUNCK ..... Président
SAPALY ..... Examinateur
COURTEL ..... Rapporteur
TRILLAT ..... Invité
MARCELIN ..... Invité

N° d'enregistrement
au C.N.R.S. AO 9049

THESE DE DOCTORAT D'ETAT ES SCIENCES APPLIQUEES

présentée

A L'UNIVERSITE PARIS VI

PAR

Monsieur **Jean BLOUET**

pour obtenir
le grade de Docteur ès-sciences

Sujet de la Thèse : **CONTRIBUTION à L'ETUDE DE L'EVOLUTION INITIALE DE L'USURE DANS LE CAS DU FROTTEMENT DE CERTAINS METAUX**

Soutenue le 13 Novembre 1973

devant la Commission d'Examen

M.M. SIESTRUNCK ..... Président
SAPALY ..... Examinateur
COURTEL ..... Rapporteur
TRILLAT ..... Invité
MARCELIN ..... Invité

UNIV.
LEIDEN
BIB.

AVANT PROPOS

Cette étude a été effectuée dans le laboratoire de mécanique des surfaces de l'I.S.M.C.M. sous la direction de Monsieur COURTEL, Directeur de Recherches au C.N.R.S., Professeur à l'I.S.M.C.M.

Monsieur COURTEL m'a initié à la tribologie et je tiens à lui exprimer ma très vive gratitude pour m'avoir permis d'entreprendre cette recherche, pour les conseils et encouragements qu'il m'a prodigués tout au long de mon travail.

Je remercie Monsieur le Professeur SIESTRUNCK d'avoir bien voulu patronner ces travaux et me conseiller en discutant les résultats et en orientant les recherches. Je suis extrêmement sensible à l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de ma thèse.

J'exprime ma profonde et respectueuse gratitude à Monsieur le Professeur TRILLAT, Vice-Président de l'Académie des Sciences, pour avoir donné des conseils et s'être intéressé à mes travaux et à leurs prolongements éventuels.

Que Monsieur le Professeur SAPALY trouve ici l'expression de toute ma gratitude pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail.

Que Monsieur MARCELIN trouve ici l'expression de ma gratitude pour l'aide bienveillante et les encouragements qu'il m'a prodigués dès mes premiers travaux dans le domaine de la mécanique des surfaces.

Je remercie Monsieur LEMARESQUIER, Directeur honoraire de l'I.S.M.C.M. qui m'a permis d'acquérir les moyens nécessaires aux études tribologiques et qui m'a encouragé à poursuivre mes travaux en portant un intérêt constant à tous les aspects de la mécanique du contact.

Je remercie Monsieur AZOU, Directeur actuel de l'I.S.M.C.M. qui m'a permis de développer les moyens nécessaires à la poursuite de mes travaux.

Je dois beaucoup aux nombreuses et fertiles discussions que j'ai eues avec mes amis et collègues parmi lesquels je mentionnerai Monsieur VINH (Maître de Conférence), Monsieur MAUGIS (Chargé de recherches), Monsieur BARQUINS (Ingénieur au C.N.R.S.), Madame STASI (Chef de travaux), Monsieur GRAS (Chef de travaux). Je remercie mes collaborateurs Monsieur MANDOUKI (Aide Technique),Monsieur ROUX (Technicien) pour l'aide efficace qu'ils m'ont apportée lors de mes études expérimentales et Madame BOUYGE qui a effectué les travaux de dactylographie.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548022_0011

INTRODUCTION

I - POSITION DU PROBLEME -

Par le terme usure le Larousse entend "la détérioration d'une chose par suite de l'usage qu'on en fait". Selon le glossaire [1] édité par le groupe de"Recherche sur l'usure des matériaux industriels"de l'O.C.D.E. "l'usure est la perte progressive de matière de la surface active d'un corps par suite du mouvement relatif d'un autre corps sur cette surface". La première définition est la plus générale. La seconde tend à présenter le phénomène d'usure essentiellement sous l'angle de la perte de matière qui en résulte. Les travaux présentés ici montrent que ce dernier point de vue doit être considéré comme un peu restrictif.

Mais ces définitions révèlent toutes deux la permanence et l'universalité du phénomène d'usure. C'est un phénomène permanent car tout au long de l'histoire des techniques, l'homme s'est toujours préoccupé d'augmenter, par un choix convenable des matériaux, la durée de vie des objets, outils et dispositifs qu'il fabriquait. C'est aussi un phénomène universel, car, l'usure se produisant inévitablement lorsque deux corps en contact glissent l'un sur l'autre, on le rencontre sur toutes les machines existantes, qui ne fonctionnent que grâce aux actions de contact transmettant les forces entre les différentes parties constitutives.

L'étude de l'usure présente un double intérêt : économique et scientifique.

D'une part l'usure est la principale cause de la mise hors service des objets et des machines. Un rapport récent [2] a estimé qu'une étude systématique des problèmes de contact aurait pour conséquence une amélioration des techniques et de leur enseignement, qui pourrait se traduire, dans le cas de la seule industrie britannique par une économie de l'ordre de 500 millions de livres par an.

D'autre part notre civilisation technologique exige de la part des mécanismes des performances de plus en plus poussées par l'augmentation des pressions de contact, des vitesses de glissement et des durées de fonctionnement. Les programmes de tribologie ont pour objet d'apporter aux ingénieurs et techniciens des données leur permettant d'améliorer les dispositifs existants ou d'en construire de nouveaux. Il s'agit d'études relevant de plusieurs disciplines scientifiques : mécanique des solides, mécanique des fluides, physique du solide, chimie .... cette pluridisciplinarité rend plus difficile la réduction des théories de l'usure à un modèle strictement déductif. Dans l'état

.../...

actuel des connaissances scientifiques il faut s'appuyer constamment sur l'expérimentation pour pouvoir étudier les mécanismes fondamentaux responsables de l'endommagement et de la transformation des surfaces.

L'expérimentation dans ce domaine comporte toujours un certain degré de schématisation par rapport aux conditions de la pratique qui sont en général très complexes et mal connues.

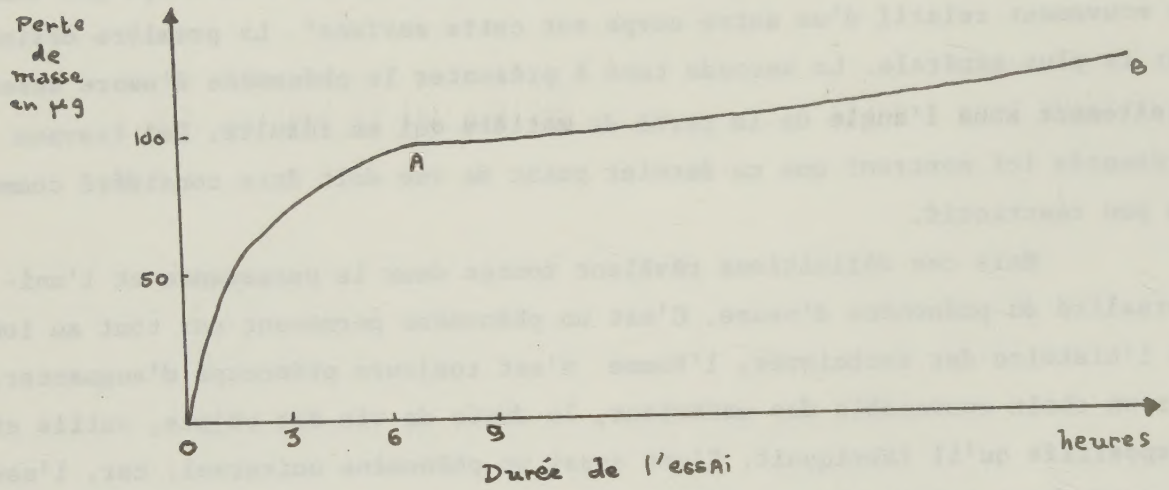


Fig.(1) d'après [3] - Evolution de la perte de masse d'un échantillon en fonction du temps.

Si à l'aide d'un usuromètre on mesure la perte de masse d'un échantillon en fonction du temps, on observe dans le cas le plus général, l'existence d'un régime transitoire suivi d'un régime stabilisé (Fig. 1) [3 et 4] Les valeurs absolues des pertes de masses et des distances parcourues dépendent de la taille des pièces considérées, et de divers autres facteurs sur lesquels nous aurons l'occasion de revenir par la suite. Dans tous les cas le régime transitoire est caractérisé par une croissance rapide de la perte de masse et le régime stationnaire par une croissance plus lente et plus régulière, pratiquement linéaire. Mais la branche O A de la courbe, communément appelée rodage, a une importance essentielle, car l'expérience montre que selon la façon dont le rodage est conduit , on atteint ou non un régime stabilisé favorable. En fait au cours du rodage, les couches superficielles des pièces en contact peuvent subir non seulement des pertes de poids mais aussi des déformations plastiques (dont certaines sont provoquées par les imperfections géométriques des organes mécaniques et de leurs surfaces) et parfois des transformations de nature physico-chimiques. Le début de l'usure avait jusqu'à présent intéressé le praticien plus que le physicien. L'attention s'était portée surtout sur l'évolution géométriques des surfaces (états de surface). Il a

paru intéressant d'appliquer les connaissances actuelles à l'étude de la phase initiale de l'usure dans un cas aussi bien défini que possible (couple acier - aluminium) c'est-à-dire d'étudier ce qui se passe au voisinage du point 0 de la courbe, avant que la perte de masse soit notable.

II - PLAN DU TRAVAIL -

L'étude ci-après se compose de trois parties principales.

Dans la première partie on trouve un classement comportant trois divisions.

1°) Les "facteurs de l'usure" ou paramètres dont le choix définit les conditions initiales de l'expérimentation ou de l'utilisation.

2°) Les effets les plus communément observés pendant une expérience d'usure.

3°) Les mécanismes ou processus élémentaires mis en jeu dans la détérioration des surfaces au cours du temps. Après un exposé et une discussion de ces processus on précise le choix des conditions et hypothèses à retenir pour l'étude à faire.

Dans la deuxième partie on décrit les dispositifs expérimentaux que nous avons conçus et utilisés pour mettre en lumière le rôle de la déformation plastique lors de la phase initiale de l'usure. Deux types de glissement sont étudiés : le glissement unidirectionnel sur un tribomètre rotatif entraînant un disque d'aluminium à une vitesse de rotation uniforme, le glissement bidirectionnel sur un tribomètre alternatif entraînant une plaquette d'aluminium d'un mouvement rectiligne alternatif.

La troisième partie contient les résultats obtenus à l'aide de ces dispositifs. Ils concernent l'usure de l'aluminium recuit. On montre l'existence, dans le cas le plus général, de trois phases sur le graphe indiquant la variation de la force de frottement en fonction du nombre de passages d'un point du plan d'aluminium sous le frotteur en acier. Ces trois phases traduisent les modifications et endommagements des couches superficielles de l'échantillon d'aluminium. Chaque phase est étudiée au moyen de différentes techniques de tribométrie : mesures des déplacements et des accélérations du frotteur, de microduretés, de la recristallisation, de l'étude des états de surface microgéométriques et physiques, de la résistance de contact. On établit une corrélation avec les facteurs suivants : oxydation thermique et anodique de l'aluminium, charge, pureté de l'aluminium, nature métallurgique du frotteur en acier, nature et composition du lubrifiant.

On constate que la description classique de l'usure, que traduit la courbe de la Fig.(1) ne permet absolument pas d'interpréter les mécanismes de détérioration des surfaces constatés ici. Il s'agit d'un aspect entièrement différent des choses.

En particulier on observe que si la déformation plastique s'effectue dans certaines conditions favorables elle peut améliorer le frottement et diminuer l'usure entre les pièces glissantes, et que les changements apportés par cette déformation plastique initiale des surfaces sont bien plus importants que ne saurait l'indiquer la mesure de perte de masse au début de l'expérience.

En conclusion, on présente en fonction des phénomènes mis en évidence par l'étude, les règles à suivre pour une préparation et un rodage rationnel des matériaux choisis.

PREMIERE PARTIE

GENERALITES CONCERNANT L'USURE

Les études sur l'usure font en général intervenir un grand nombre de paramètres, de modes d'observations et de processus physiques. Nous présentons ici un classement comportant trois parties :

1°) Les "facteurs de l'usure" ou paramètres dont le choix définit les conditions initiales de l'expérimentation et de l'utilisation. [5] à [9] : mode de contact, état de surface microgéométrique, charge, vitesse, ambiance, nature des matériaux.

2°) Les effets les plus fréquemment observés pendant la détérioration des surfaces [9] : résistance au déplacement, vibrations, phénomènes thermiques, transformations géométriques, transformations mécaniques, et tribo-chimiques, variation de masse.

3°) Les mécanismes ou processus élémentaires mis en jeu dans la détérioration des surfaces au cours du temps [10] à [12] : Adhésion, abrasion, érosion, déformation, fatigue, corrosion et des combinaisons de tout ou partie de ces processus.

Un bref commentaire des deux premières parties de ce classement nous permettra d'une part de présenter de façon plus détaillée les différents processus de détérioration des surfaces, et d'autre part de justifier le choix des conditions et hypothèses mises à la base de notre travail.

I - LES FACTEURS DE L'USURE -

I-1 - Mode de contact -

La forme géométrique des pièces avant utilisation permet de distinguer :

- les contacts ponctuels, exemple: sphère sur plan
- les contacts linéaires, exemple: cylindre mâle dans cylindre femelle
- les contacts surfaciques, exemple: plan sur plan

On peut ajouter la distinction entre contacts conformels ou contraformels selon que les courbures des surfaces sont de même signe ou de signe opposé [13]. Sur les premières l'aire de contact peut croître rapidement sous l'effet des surcharges ou des usures.

Le mode de contact géométrique influe sur le rôle que les différentes pièces jouent tout au long de la durée d'utilisation du mécanisme. Pour illustrer ce propos considérons Fig.(2) l'exemple d'un patin plan qui se déplace sur une glissière plane entre deux points A et B.

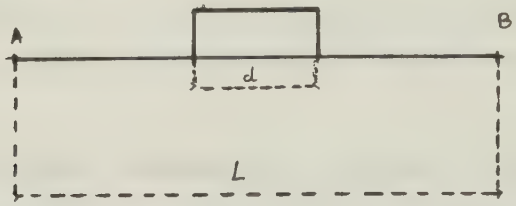


Fig.(2) - Schéma d'un patin plan glissant sur une glissière plane.

Un point situé sur la surface du patin est constamment sollicité par le frottement, tandis qu'un point situé sur la glissière ne l'est que lors du passage du patin. Les surfaces soumises au frottement sont dites sur le patin "petite surface" et sur la glissière "grande surface". Si le patin passe une fois entre A et B on dit que le circuit d'usure est ouvert, s'il passe plusieurs fois on dit qu'il est fermé. Le nombre $\frac{d}{L}$ appelé rapport de service conditionne la fatigue des couches superficielles et l'écoulement de la chaleur entre les deux pièces en contact.

I-2 - Etat de surface microgéométrique -

Ce facteur a été séparé du précédent en raison de son importance industrielle et des difficultés métrologiques que présente son contrôle.

Dans le paragraphe précédent nous avons supposé que la forme géométrique des solides en contact était parfaite. En réalité du fait de la nature physique des différents procédés d'usinage, les pièces réelles présentent par rapport à leur forme idéale des défauts géométriques. Le principe de mesure permet de définir la forme idéale, la microgéométrie et les aberrations microgéométriques [14]. L'une des conséquences de l'existence de ces aberrations géométriques est que l'aire réelle de contact Ar n'est souvent qu'une faible fraction de l'aire apparente de contact Aa.

I-3 - Charge -

C'est la résultante P des projections sur la normale en chaque point de contact des actions de contact. Nous préférons préciser la charge plutôt que la pression qui n'est souvent connue par le calcul qu'avec une grossière approximation. En effet la géométrie et la nature des couches superficielles dans bien des cas ne sont pas connues avec précision.

Appliquée avant ou après le début du glissement elle peut pendant une expérience garder une valeur constante ou varier de façon progressive ou échelonnée. Elle est de l'ordre de 10^{-6} N, dans certains mécanismes horlogers, mais peut atteindre 10^{6} N, dans le cas de certains éléments de l'industrie routière.

I-4 - Vitesse -

Il s'agit, suivant les cas, des vitesses: de glissement, de roulement ou de pivotement. Dans le cas du glissement à sec elle influe surtout sur la température superficielle des pièces en contact, et dans le cas du glissement lubrifié elle est un facteur important d'établissement du régime hydrodynamique. Nulle au départ, puis croissant progressivement elle peut en un point d'une surface garder toujours la même direction, ou bien changer périodiquement de sens. Elle peut varier de quelques microns par seconde lorsque les supports des machines se déplacent sous l'effet des dilatations thermiques ou bien atteindre plusieurs centaines de mètres par seconde dans le cas de projectiles se déplaçant sur leurs guides.

I-5 - Ambiance -

Par ce terme nous entendons la nature du milieu ainsi que les conditions de pression et de température qui entourent les pièces dans la région du contact y compris la lubrification.

I-6 - Nature des matériaux -

Il s'agit de la composition chimique, de la structure métallurgique et des propriétés mécaniques des métaux et alliages, et plus particulièrement des couches superficielles. En effet les problèmes d'usure mettent en jeu les surfaces et plus précisément les interfaces et les couches superficielles des corps en contact. Dans le cas le plus général en observant la coupe d'un matériau métallique usuel par un plan perpendiculaire à sa surface on peut distinguer successivement quatre couches : Fig.(3) [15].

a) Une zone en cours d'écrouissage

b) Une zone intrinsèquement écrouie

c) Une couche amorphe

d) Une couche adsorbée

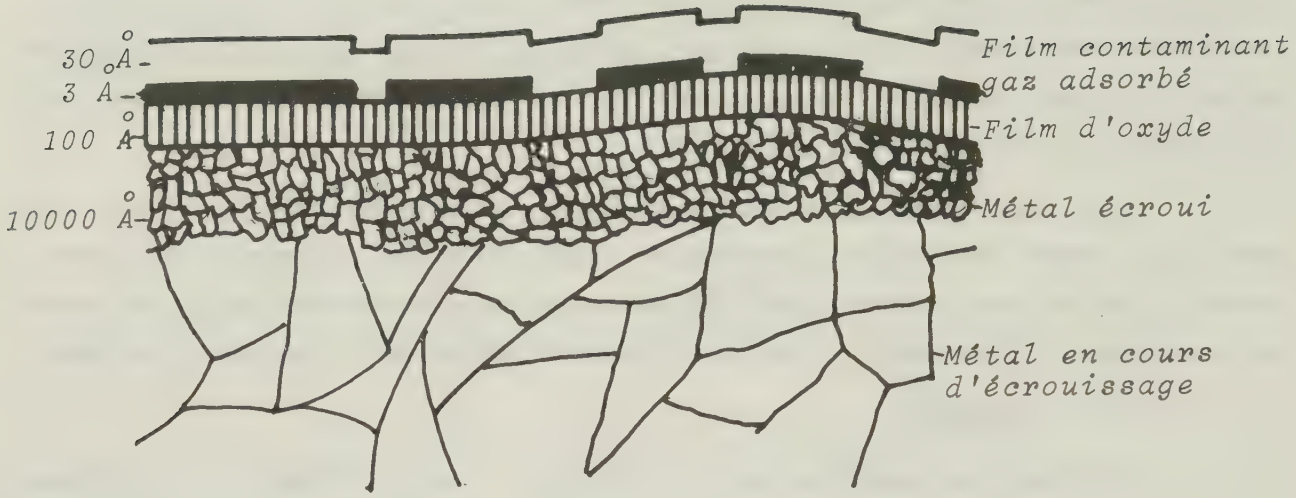


Fig.(3) - Coupe schématique d'un matériau métallique usuel par un plan perpendiculaire à sa surface.

Ces couches possèdent une structure composite. Le contact de deux pièces réelles s'établit donc par l'intermédiaire de couches complexes dont la nature, la géométrie et les propriétés sont souvent mal connues.

Le mode de contact, les états de surface microgéométriques, et la nature des matériaux évoluent au cours d'une expérience;tandis que la charge, la vitesse et l'ambiance peuvent être fixées et connues avec une grande précision. Cette liste ne fait pas ressortir des grandeurs physiques importantes telles que la pression et l'aire réelle de contact mais la connaissance de ces facteurs permet de préciser une situation tribologique donnée et assure la reproductibilité des résultats expérimentaux.

II - LES EFFETS OBSERVABLES -

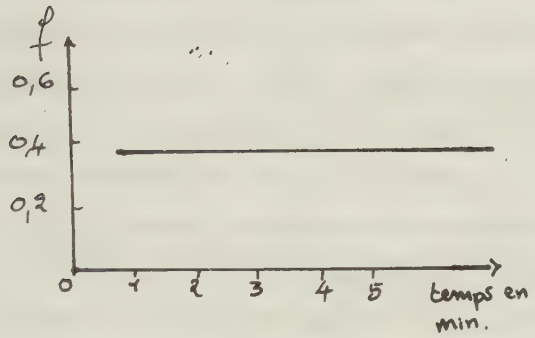
II-1 - Résistance au déplacement -

Suivant les applications on mesure, des couples de roulement, de pivotement ou des forces de frottement. Dans le cas du glissement les forces de frottement sont généralement traduites en coefficient de frottement [16]. Les courbes donnant l'évolution des coefficients de frottement en fonction du temps appartiennent en général aux trois types suivants, Fig.(4).

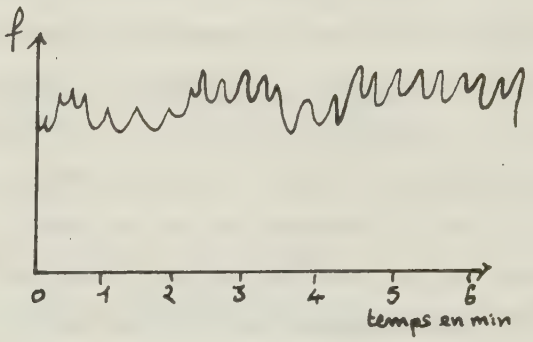
a) Le coefficient de frottement faible ou élevé garde une valeur constante. Les destructions superficielles sont faibles. [17]. (Fig. 4-1)

b) Le coefficient de frottement évolue comme si à un phénomène variant de façon continue se superpose un phénomène variant de façon aléatoire. Les destructions superficielles sont importantes [17].(Fig.4-2)

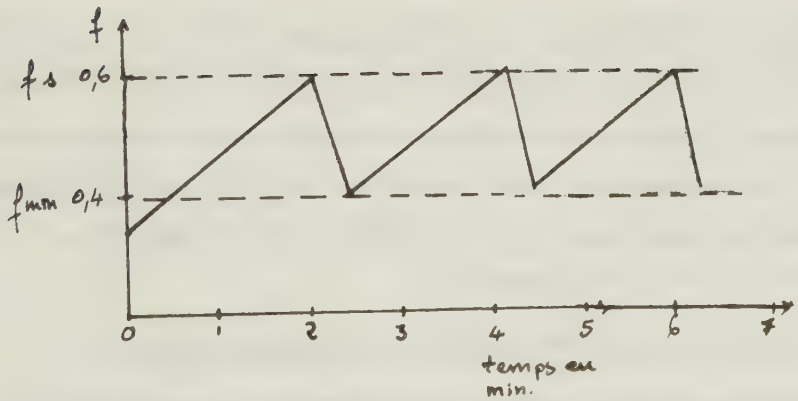
c) La courbe montrant l'évolution du coefficient de frottement en fonction du temps a l'allure d'une oscillation de relaxation, de période et d'amplitude constantes, c'est le phénomène de glissement saccadé.(Fig 4-3) L'existence de ce phénomène peut être attribuée à une différence entre les coefficients de frottement statique fs et le coefficient de frottement dynamique fd, [18] ou à l'influence du temps de contact sur la force de frottement [19].



1



2



3

$$f_d = \frac{f_{min} + f_s}{2}$$

Fig.(4) - Allure schématique des courbes d'évolution du coefficient de frottement de glissement en fonction du temps.

II-2 - Vibrations -

Les vibrations apparaissant au cours du contact sont inhérentes au phénomène de frottement lui-même. Elles correspondent aux variations de la force de frottement Fig.(4 2 et 3). Il se produit des vibrations normalement aux surfaces de glissement [20] et [21] et il existe une corrélation entre ces vibrations et certains endommagements des parties frottantes [22]. Certaines instabilités du dispositif de mesure tribométrique sont provoquées par des confusions de fréquences entre les vibrations parallèles aux surfaces de glissement et celles qui leur sont perpendiculaires [23] et [24] . Dans le cas du glissement du bronze contre l'acier nous avons montré que certaines instabilités vibratoires dépendent du régime d'usure.

II-3 - Phénomènes thermiques -

La température de la zone de contact est la somme de la température ambiante et de deux termes additionnels, tous deux dérivés de la chaleur engendrée par le frottement. Le premier terme est l'accroissement de la température moyenne dans la masse des éprouvettes au-dessus de la température ambiante. Ce terme est généralement faible devant le deuxième qui correspond à un accroissement temporaire de la température en un point de la surface en mouvement lorsqu'il passe au droit de la zone de contact. Cet accroissement brutal provient du fait que toute l'énergie dégagée par le frottement se fait dans un volume de faible capacité calorifique. Ce deuxième terme appelé température éclair peut atteindre la température de fusion du corps possédant la plus basse température de fusion [25] à [30] .

II-4 - Transformations géométriques -

Sous l'effet de la charge et du frottement les aspérités microgéométriques des surfaces des corps en contact sont le siège de déformations élastiques ou plastiques. On considère en général que l'état de surface microgéométrique s'améliore au cours du rodage. Les aspérités superficielles peuvent être écrasées ou arrachées. Dans certaines circonstances il y a apparition de rayures, de fissures et émergences de certains plans de glissement.

II-5 - Transformations mécaniques et tribochimiques -

Les contraintes et les cycles thermiques ont pour effet de transformer les matériaux et plus particulièrement les couches superficielles. Les changements rapides de température peuvent être à l'origine d'apparition de phases qu'il n'est pas possible d'obtenir par d'autres procédés. On observe des oxydations, des changements de composition chimique, des destructions de grains, des écrouissages, des effets triboélectriques.

II-6 - Variation de masse -

Si on trace la courbe qui représente d'après la littérature la perte de masse en fonction du temps Fig.(5) on peut distinguer dans le cas d'un organe de machine trois parties distinctes.

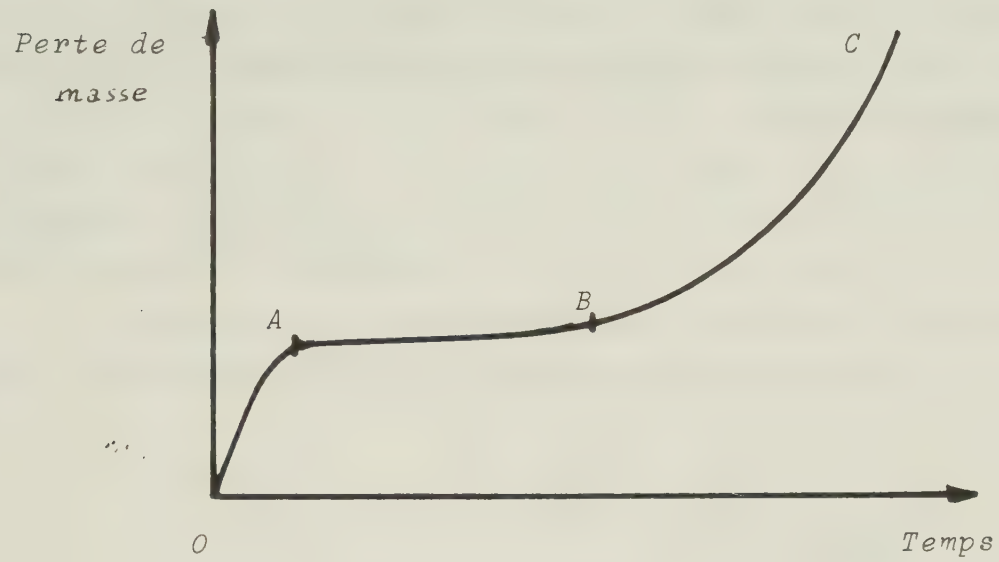


Fig.(5) - Evolution de la perte de masse en fonction du temps.

1°) La partie O A pendant laquelle l'usure est rapide, que l'on appelle plus communément rodage.

2°) La partie A B qui correspond à l'utilisation normale de la machine.

3°) La partie B C qui apparait au bout d'une certaine durée de fonctionnement et qui conduit sous l'effet de l'augmentation des jeux et des efforts à la disparition des films lubrifiants et à la destruction des éléments de machine.

Classiquement les pertes de masse peuvent être déterminées à partir des méthodes suivantes :

1°) Mesures pondérales, par la pesée des pièces à des instants choisis à l'avance.

2°) Mesures dimensionnelles.

On mesure les variations de dimensions des pièces au cours de leur utilisation.

3°) Etudes de la pollution des lubrifiants.

La méthode de la tache d'huile permet par examen de la tache sur un papier perméable de connaitre la teneur de l'huile en impuretés.

4°) Utilisation de traceurs radioactifs [31]

5°) Mesure de la microgéométrie [32]

II-7 - Conclusions -

Les trois derniers types de phénomènes observés traduisent l'endommagement et la détérioration des surfaces frottantes. C'est pourquoi la mesure de la perte de masse d'un échantillon ne constitue pas généralement une méthode suffisamment analytique pour étudier la phase initiale de l'usure, car les variations de masse peuvent se produire après que les surfaces en contact ont subi de nombreuses modifications.

III - LES MECANISMES DE L'USURE

III-1 - Détérioration des surfaces par adhésion, Usure adhésive -

III-1-1 - Définition et principe -

La manifestation première de l'usure adhésive est le transfert du matériau d'une des pièces frottantes sur la surface du corps antagoniste.

Examinons un palier constitué d'un arbre tourillonnant dans un coussinet et qui a grippé en cours de fonctionnement. L'arbre étant en acier, le coussinet en bronze, sur l'arbre dans la zone de grippage on aperçoit l'existence d'une couche de bronze. La surface du coussinet présente des rayures et des arrachements. L'ensemble a été détérioré par usure adhésive, en raison de l'adhésion importante du bronze sur l'acier.

L'explication la plus cohérente du transfert a été proposée par Bowden [33]. Considérons le contact de deux corps métalliques (Fig. 6)

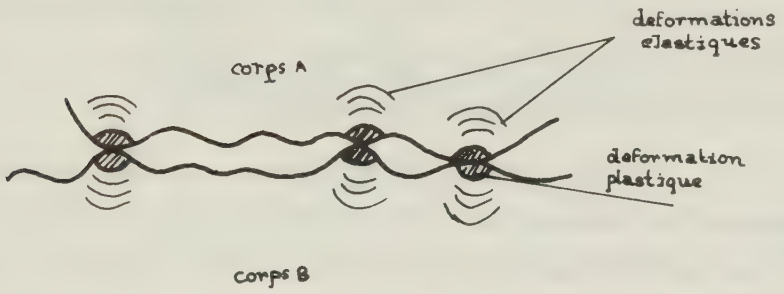


Fig.(6)

Les surfaces des corps réels comportent des aspérités dont les dimensions sont très grandes si on les compare à la maille atomique. Ces aspérités existent quelque soit le soin apporté à la préparation des surfaces. Le contact de deux corps s'établit par l'intermédiaire de ces aspérités, ce qui fait que l'aire réelle de contact n'est q'une faible partie de l'aire apparente.[34][36] Le contact s'effectue en des zones discrètes. Certaines aspérités sont en déformation plastique sous une pression de contact égale à la dureté du métal le plus mou. Le rapprochement des atomes de chacun des corps métalliques est suffisant pour donner naissance à des jonctions métalliques qui peuvent constituer de véritables soudures à froid.[37]

Si toutes les jonctions participent à la résistance au déplacement, certaines d'entre elles peuvent donner naissance à des débris d'usure. La probabilité k pour qu'une jonction fournisse un débris d'usure est en général faible et dépend des différents facteurs de l'usure.

Selon les propriétés mécaniques (résistance à la rupture) de la jonction par rapport à celles des matériaux A et B qui lui ont donné naissance on peut trouver les situations suivantes principalement dans le cas du glissement à sec.[33]

1°) La jonction est plus faible que l'un et l'autre corps métalliques. Le glissement provoquera la rupture à l'interface là où les jonctions ont été formées. La quantité du métal enlevé de l'une et l'autre surface sera négligeable, même si la résistance au déplacement est relativement élevée. C'est le cas d'un alliage d'étain glissant contre l'acier. Le coefficient de frottement est de 0,7 et après 400 passages la détérioration des surfaces est faible. Ce type de jonction existe lorsque les surfaces métalliques sont recouvertes d'un film très adhérent d'oxyde, de sulfure, de chlorure ; les films superficiels même s'ils sont de faible épaisseur empêchent la formation de fortes jonctions métalliques, s'ils ne sont pas rompus par la déformation du métal sous-jacent.

2°) La jonction est plus forte que l'un des métaux. La rupture aura lieu dans la masse du métal le plus faible et des fragments du matériau le plus mou vont adhérer à la surface la plus dure. On dit qu'il y a transfert du matériau le plus mou sur le matériau le plus dur.

3°) La jonction est plus résistante que les matériaux qui lui ont donné naissance. La rupture se produira dans la masse du matériau le plus mou. Dans ce cas une grande quantité de métal mou sera enlevée, mais on observera aussi des arrachements dans la masse du matériau le plus dur. C'est ce qui est observé lorsqu'un frotteur en cuivre glisse sur la surface d'un échantillon d'acier.[33]

Un cas particulier intéressant est celui où les deux pièces en contact sont constituées de métaux identiques. Les zones en contact sont écrouies. Les jonctions possèdent des propriétés mécaniques supérieures à celles du métal originel. Les ruptures se produisent rarement à l'interface et les destructions superficielles sont considérables.

L'observation et l'évolution de la perte de masse au cours du temps ne peuvent être complètement interprétées à l'aide de ces lois. D'autres phénomènes peuvent intervenir (oxydation, adsorption, lubrification) ainsi que les différent facteurs de l'usure : mode de contact et notamment sa symétrie, charge, vitesse, ambiance, nature des matériaux. Etudions l'influence de chacun de ces facteurs sur la détérioration des surfaces glissantes par usure adhésive. Dans les différentes situations tribologiques l'un des facteurs joue un rôle prépondérant mais son effet ne peut être interprété que si l'on connaît les autres facteurs.

III-1-2 - Mode de contact -

A) Influence de la dissymétrie du contact sur la détérioration des surfaces.

En étudiant l'endommagement des pièces glissantes lorsqu'un frotteur sphérique glisse sur un échantillon plan ANTLER [38] a montré qu'il existe selon la nature des matériaux, 4 modes principaux de destruction des surfaces. Il a fait glisser à sec une sphère de 3 mm de diamètre sur une piste plane sous une charge de 500 g à une vitesse de 1 cm/s.

1°) Il se forme aux dépens de la grande surface une arête rapportée en avant du frotteur.

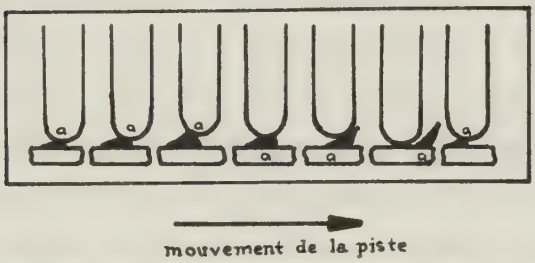


Fig.(7)

d'après [38]- Représentation schématique du mécanisme de formation d'arête rapportée en avant. La lettre a désigne la surface sur laquelle l'arête rapportée adhère.

Dès le début du mouvement il se forme un copeau aux dépens de la piste. Ce copeau sépare le frotteur de la piste et croît dans la direction du glissement puis il passe sous le frotteur et le cycle recommence. La conséquence principale de ce phémonène est que le glissement a lieu à l'interface copeau-piste.

Deux explications ont été proposées pour expliquer l'apparition d'une arête rapportée en avant.

a) L'adhésion qui joint les surfaces en contact est responsable de la déformation des zones superficielles qui se produit dès le début du mouvement Fig. (8) . Les contraintes n'étant pas identiques dans le frotteur et la piste, le cisaillement se produit sur la piste en faisant un certain angle avec la surface. Ceci cause une émergence à partir de la piste en créant une arête rapportée qui croît dans la direction du glissement. [39]

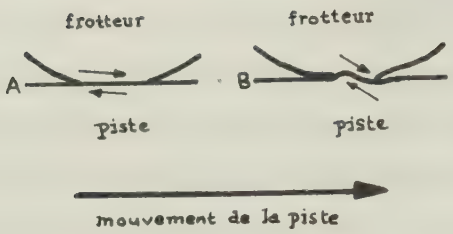


Fig.(8)

D'après [39] - Formation d'une arête rapportée en avant, A contact entre les surfaces vierges, B distension des surfaces produite sur une courte distance. [39]

b) Le transfert initial s'effectue préférentiellement sur le frotteur, car un point de la surface du frotteur est sollicité en permanence, tandis qu'un point de la surface de la piste ne l'est que d'une façon périodique. Les particules transférées adhèrent fortement entre elles et au frotteur et finissent par suite de l'écrouissage par être plus dures que la piste. Elles forment une arête rapportée dure qui peut labourer la piste.

Les conditions d'apparition de ce mode de destruction sont les suivantes :

a) glissement sévère, c'est-à-dire métal métal sous une charge importante sans interposition d'un film d'oxyde.

b) existence d'un transfert important - c'est-à-dire que les jonctions métalliques doivent avoir une taille importante.

c) la grande surface ne doit pas être trop dure. En général ce mécanisme est observé lorsque le frotteur est plus dur que la piste, a la même dureté ou une dureté légèrement inférieure.

d) la température de recuit de la piste doit être supérieure à celle qui est atteinte au cours du glissement. Sinon le métal constituant l'arête rapportée est recuit et cette dernière ne peut labourer la piste.

e) le métal transféré sur le frotteur doit être plus dur que celui de la piste originelle. L'accroissement de dureté étant dû principalement à l'écrouissage.

En écrivant d'abord la nature du métal constituant le frotteur, ce mécanisme s'observe sur les corps suivants : Aluminium/aluminium, Cuivre/cuivre, Or/or, Titane/titane, Or/plomb, rhodium/or, Or/beryllium.

Les conséquences du mécanisme de formation d'arête rapportée sont les suivantes :

a) la dissymétrie géométrique entraîne la dissymétrie de l'usure. L'arête rapportée se formant aux dépens de la piste, le coefficient de frottement est celui du métal constituant la piste sur lui-même. La figure (9) montre le cas du palladium et de l'or. Un frotteur de palladium sur une piste d'or à le même coefficient de frottement qu'un frotteur d'or sur une piste d'or. De même un frotteur de palladium sur une piste de palladium a le même coefficient de frottement qu'un frotteur d'or sur une piste de palladium.

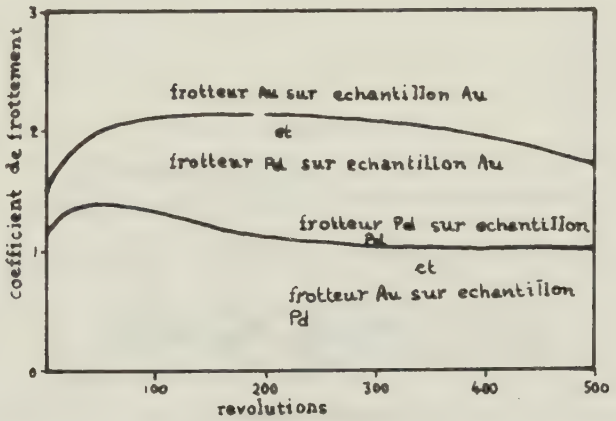


Fig.(9)

Influence de la nature de la piste sur l'évolution du coefficient de frottement au cours du temps. d'après [40]

Ceci peut avoir des conséquences pratiques, par exemple si on considère le couple acier - titane, il est recommandé pour obtenir le coefficient de frottement le plus faible de prendre la plus petite des surfaces en titane. [41] En effet si le frotteur est en titane et la piste en acier, en présence d'acide palmitique le coefficient de frottement est de 0,09, même valeur que celle donnée par le couple acier/acier tandis que dans le cas inverse il est de 0,48, le même que pour le couple titane - titane.

b) les particules d'usure libres sont produites à partir d'arêtes rapportées, ce qui explique qu'elles ont même forme et même dimension.

c) les arêtes rapportées peuvent être à l'origine de surcharges brutales, conduisant à la destruction des mécanismes. Ceci se produit lorsque le système ne possède pas de degré de liberté normalement aux surfaces en contact.

d) la résistance au déplacement et la résistance électrique de contact varient au cours du temps. Les arêtes rapportées qui sont transférées sur la piste ont pour effet de changer ses propriétés mécaniques (par suite des écrouissages) et sa microtopographie superficielle.

2°) Il se forme aux dépens de la piste une arête rapportée en arrière du frotteur.

Ce phénomène (qui n'a pu être interprété) s'observe lorsqu'un frotteur d'or glisse sur une piste en plomb - étain.

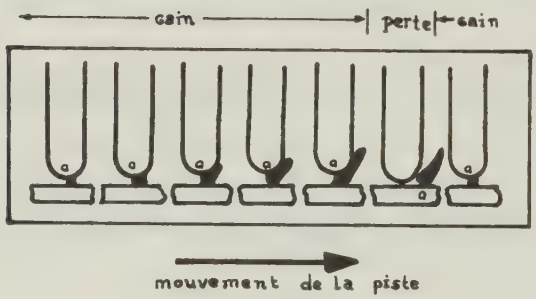


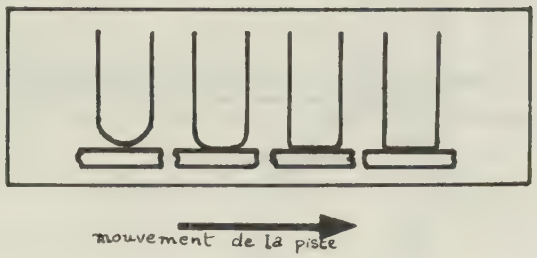
Fig.(10)

Formation d'une arête rapportée en arrière du frotteur, a désigne la pièce sur laquelle adhère le copeau.

Il se forme aux dépens de la piste une arête rapportée dès que la force d'adhésion à l'interface piste-arête est supérieure à celle qui existe à l'interface frotteur-arête, cette dernière se détache et le mécanisme recommence. Ce mode de détérioration, très particulier semble traduire la superplasticité des alliages plomb-étain à la température d'expérience. [42]

3°) Usure du frotteur -

Ce phénomène peut-être considéré comme l'inverse du mécanisme d'usure par arête rapportée. C'est le frotteur qui s'use, le matériau constituant le frotteur adhère fortement sur la piste Fig.(11), et le matériau transféré adhère faiblement au frotteur.



Usure du frotteur

Fig.(11)

Ce mécanisme, le plus fréquemment décrit dans la littérature, s'observe dans les cas suivants :

a) Les contacts métal/métal sont peu importants par suite de l'oxydation des débris d'usure ou la présence d'un lubrifiant.

b) Les matériaux métalliques en contact sont très durs et les particules d'usure sont petites.

c) Sous charge importante lorsque le frotteur est bien plus mou que la piste, exemple : (Or/rhodium).

d) Après transformations structurales et microtopographiques de la surface de la piste par la création d'arête rapportée en avant le mode de destruction des surfaces peut changer. On passe du régime d'usure de la piste à celui de l'usure du frotteur.

Ce mode de destruction s'observe sur les couples suivants : Antimoine/antimoine, Fer/fer, Nickel/nickel, Rhodium/rhodium. Le mécanisme d'arête rapportée en avant se transforme en usure du frotteur dans les cas suivants : Aluminium/aluminium, Cuivre/cuivre, Or/or, Palladium/palladium, Argent/argent.

4°) Grippage, fluage -

Le frotteur se déforme lorsque la piste est déplacée, il n'y a pas de glissement à l'interface frotteur-piste Fig.(12)

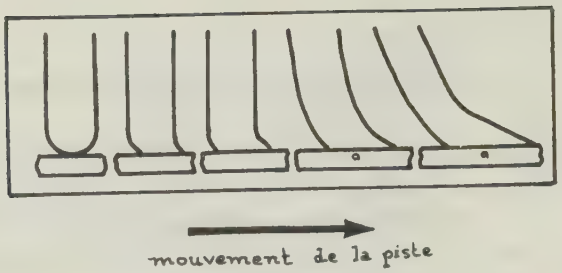


Fig.(12)
Grippage et destruction par glissement, d'après [38]

Dans ce type de destruction des surfaces, la température de recuit du métal ne dépasse pas la température atteinte au cours de l'expérience, ce qui empêche l'écrouissage d'intervenir. Cette condition est remplie par l'indium à la température ambiante. A haute température dans le vide, les autres métaux se comportent comme l'indium. [43]

Les travaux qui viennent d'être présentés ont été effectués à l'aide de frotteurs hémisphériques se déplaçant sur des pistes planes. Quand on augmente l'aire de contact pour utiliser des contacts de type plan/plan, les jonctions sont de plus grande taille [45] que celles obtenues dans le cas précédent et sous vide à haute température on peut obtenir la soudure des pièces frottantes dès le début du glissement. [45]

B) Comparaison entre glissement sur circuit ouvert et fermé selon que le frotteur est plus mou ou plus dur que la piste.

Les mécanismes décrits ci-dessus permettent de comprendre les résultats d'apparence contradictoire contenus dans la littérature concernant les résultats d'usure entre glissement sur circuit ouvert et fermé selon que le frotteur est plus mou ou plus dur que la piste.

Le principe d'obtention des circuits de glissement ouverts et fermés sont indiqués sur la figure (13) . En circuit ouvert un outil de tournage usine la piste, le frotteur glisse sur une surface fraîche qui vient d'être usinée. En circuit fermé, on recule l'outil de tournage, et le frotteur repasse indéfiniment sur la même trace.

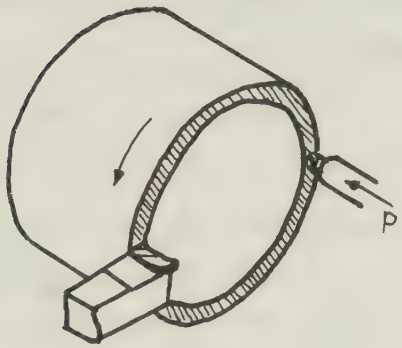
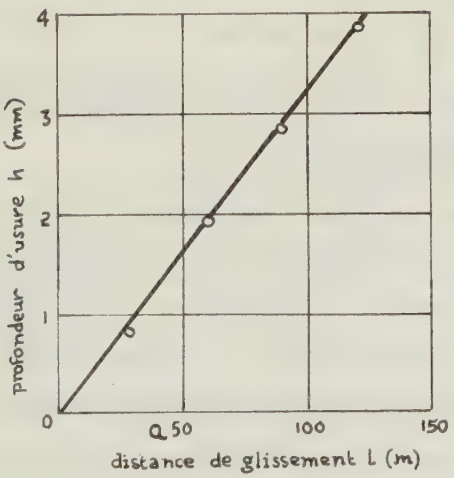


Fig (13)- Principe d'obtention d'un circuit ouvert et fermé, d'après [46] et [47]

Cas d'un frotteur mou (cuivre) sur une piste dure (acier) [46]

Sur la figure (14) on peut voir les courbes montrant l'évolution de la perte de masse du frotteur en fonction de la distance de glissement dans les 2 cas précédents. L'allure des deux courbes est différente. En circuit ouvert la perte de masse croît linéairement avec la distance de glissement. En circuit fermé la perte de masse, qui augmente rapidement pendant les 1000 premiers passages, croît de moins en moins vite pour atteindre un taux de croissance très faible en fin d'essai. La perte totale de masse sur circuit ouvert est plus grande qu'en circuit fermé pour une distance de glissement donnée.



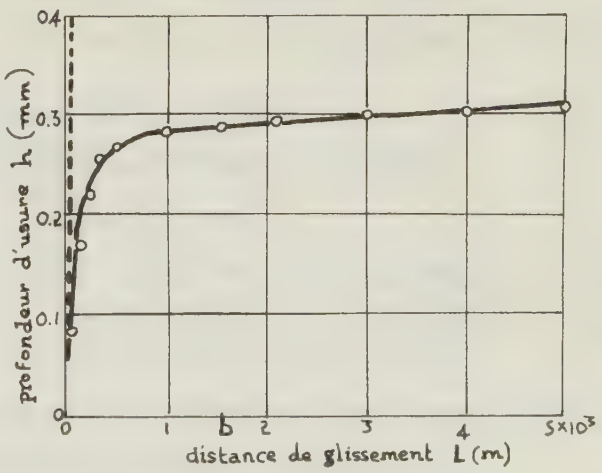


Fig (14) , d'après [46]- Raccourcissement du frotteur en fonction de la distance de glissement, a : circuit ouvert, b : circuit fermé, facteurs de l'usure : contact plan sur plan, piste : Ø ext. 75 mm, Ø int. 65 mm, frotteur cylindrique Ø 5 mm. Rugosité totale 10 μ_m pour la piste, 1 μ_m pour le frotteur, glissement à sec à l'air ambiant, pression 32 daN/cm^2, vitesse 7,5 cm/s.

Les mêmes phénomènes se produisent en présence d'un lubrifiant Fig.(15) Quand le frotteur a glissé en circuit fermé (segment A C) et qu'on le déplace sur une surface fraiche (segment C D) il retrouve le même taux d'usure qu'en circuit ouvert (segment A B).

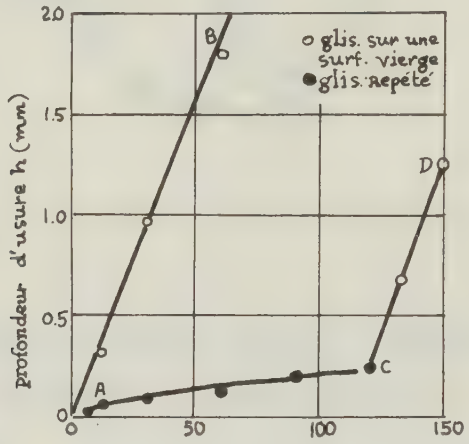


Fig.(15)- d'après [46] - Raccourcissement d'un frotteur en cuivre en fonction de la distance de glissement. Les facteurs de l'usure sont les mêmes que ceux qui sont inscrits sur la Fig.(14) , sauf la pression qui est de 78 da N/cm^2.

La différence essentielle entre les glissements en circuit ouvert et fermé est que dans le cas du circuit fermé après le premier passage il se produit un glissement cuivre sur cuivre, tandis qu'en circuit ouvert il y a en permanence transfert du cuivre sur l'acier. Le transfert cuivre sur cuivre transféré est plus faible que le transfert cuivre sur acier.

Cas d'un frotteur dur en acier (dureté Vickers 1050 da N/mm^2 sur une piste molle en acier (dureté Vickers 240 da N/mm^2).

Le résultat obtenu est inverse de celui qui vient d'être décrit dans le paragraphe précédent. La perte de masse du frotteur est plus grande en circuit fermé qu'en circuit ouvert. La fig.(16)montre l'évolution en fonction du temps de la perte de masse d'un frotteur vierge glissant sur un circuit fermé et d'un frotteur usagé glissant sur un circuit ouvert. L'allure des deux courbes est analogue mais la perte de masse est plus forte en circuit fermé.

La différence de comportement s'explique par l'existence d'une arête rapportée qui se constitue aux dépens de la piste dès le début du glissement. Dans un premier temps il y a transfert du matériau de la piste sur le frotteur, le glissement à lieu entre cette arête rapportée et la piste. Puis cette arête rapportée quand elle a atteint une certaine taille se détache du frotteur et reste collée à la piste. L'usure du frotteur est faible.

Si le frotteur glisse sur un circuit ouvert le processus continue, tandis que s'il se déplace sur un circuit fermé il rencontre ces arêtes rapportées écrouies et oxydées, plus dures que la piste originelle. C'est le frotteur qui s'use. On est passé du processus de formation d'arête rapportée en avant à celui d'usure du frotteur.

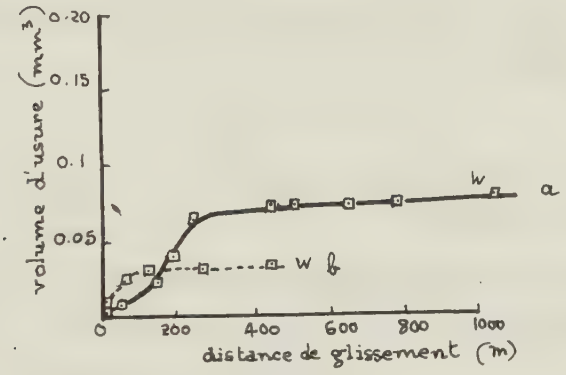


Fig.(16 - Evolution de la perte de masse du frotteur en fonction de la distance de glissement, d'après [47].

a) frotteur vierge sur circuit fermé

b) frotteur usagé sur circuit ouvert

facteurs de l'usure : contact ligne sur plan - charge 25 da N - vitesse de glissement 1 cm/s - frotteur acier type 18.4.1 à 5 % de cobalt HV : 1050 da N/mm^2, piste acier : 0,07 % C, 0,34 % Mn, 0,03 % P, 0,05 % Si, 0,03 % S, HV 240 da N/mm^2,

III-1-3 - Influence de la charge sur la détérioration des surfaces par usure adhésive (la vitesse de glissement est faible ou modérée).

En faisant croître la charge à partir de valeurs faibles on observe généralement des variations très rapides du taux d'usure à partir de certaines charges. L'existence de ces seuils a été observée dans des conditions expérimentales

variées sur les couples suivants : acier doux/acier dur, [48] [49] , or/or [50] cuivre/cuivre [38], laiton/acier [51], fer/acier [52], acier à 3 % de chrome sur lui-même [53], acier/fonte [54] .

Les seuils, qui s'accompagnent de changements dans la taille et la nature des particules transférées, sont dûs à la destruction des surfaces sous l'augmentation des contraintes ou à leurs transformations sous l'effet des échauffements superficiels.

Si on étudie, en se plaçant au-dessous d'un seuil de transformation, la perte de masse d'un frotteur mou qui glisse sur une surface dure on observe dans un grand nombre de cas que le volume enlevé V est proportionnel à la charge P et à la distance de glissement L.

$$V = k_1 P L \quad (1)$$

Cette équation a pu être établie par le calcul [54], [55] à partir d'hypothèses simplificatives et s'écrit :

$$V = k \frac{P L}{H_B}$$

où H_B est la dureté Brinell.

Burwell et Strang [48], [49] l'ont vérifié en mesurant le raccourcissement h d'un frotteur conique.

En divisant les deux membres de l'équation (1) par l'aire apparente de contact Aa il vient :

$$\frac{V}{Aa} = k' \frac{P}{Aa} L$$

$$h = k' p L$$

$$\frac{h}{P L} = k' = \frac{k}{H_B} = \text{constante}$$

Or, si on trace la courbe montrant la variation de $\frac{h}{L p}$ en fonction de p Fig. 17 on observe qu'elle se compose de deux parties.

Pendant la partie I la quantité $\frac{h}{p L}$ est une constante, le volume usé est proportionnel à la charge. L'accroissement de la charge se traduit par un accroissement du nombre des points de contact.

Dans la partie II toutes les aspérités sont déjà en contact, un accroissement de la charge se traduit par un accroissement de la taille des jonctions, la Fig. (18) illustre ces considérations.

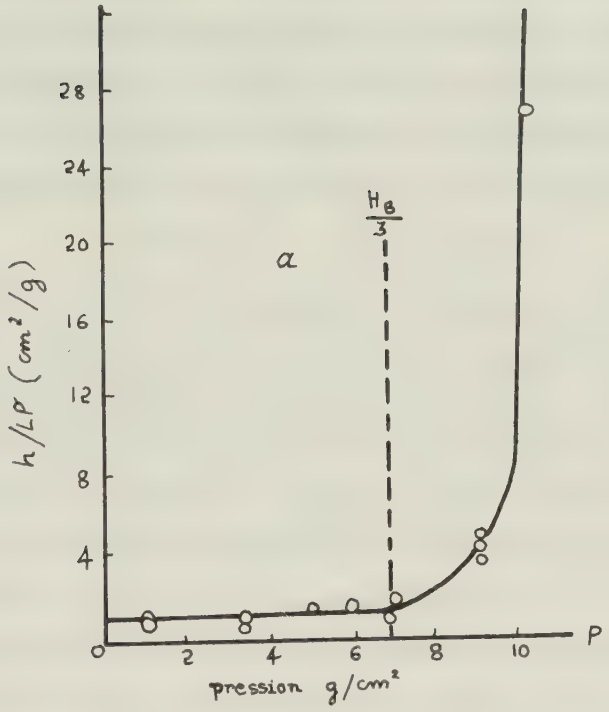


Fig.(17), d'après [48] - Evolution du quotient du taux d'usure par la pression en fonction de la pression.
Facteurs de l'usure : frotteur conique d'angle au sommet 120° - Vitesse de glissement 20 cm/s - frotteur en acier (H B : 223 da N/mm^2) la piste en acier (H B = 550 da N/mm^2), lubrifiant : hexadécane.

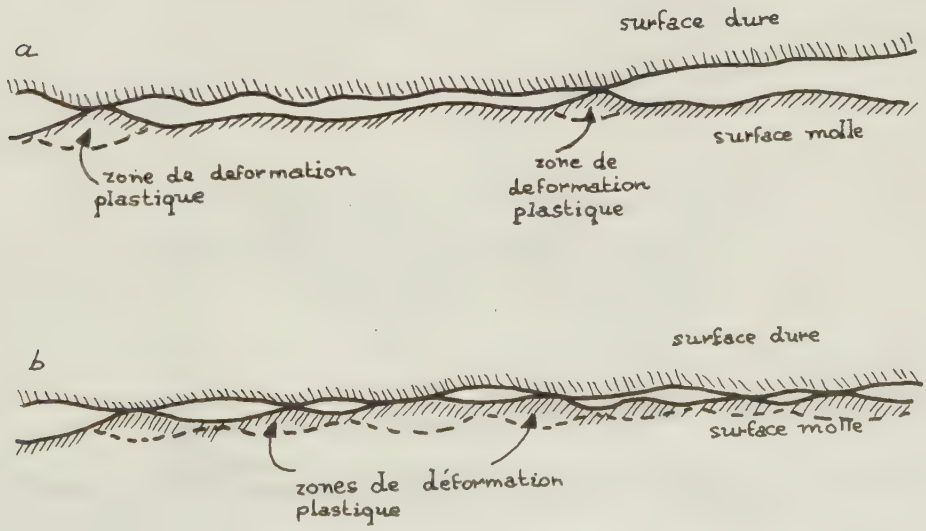


Fig.(18), d'après [48] schéma du contact (a) sous faible charge région I, (b) sous forte charge région II.

La pression critique est de l'ordre du 1/3 de la dureté Brinell, à cette pression l'aire réelle de contact est une fraction notable de l'aire apparente. On suppose que dans de telles conditions les particules transférées qui sont d'une taille importante participent elles aussi à la destruction du frotteur, provoquant une augmentation considérable de la quantité $\frac{h}{L\ p}$.

Des courbes d'allure identique ont été obtenues en utilisant des frotteurs sphériques, en glissement sec et lubrifié.

Le seuil critique peut apparaître pour des pressions inférieures à la pression critique lorsqu'il y a concurrence entre deux phénomènes : constitution d'un film protecteur, et destruction de ce film sous l'action de la charge. C'est ce que l'on observe dans le cas d'un cylindre de laiton glissant à sec dans l'air ambiant Fig (19) d'après [51] et [57] . Le film protecteur est constitué grâce à des réactions chimiques entre les surfaces frottantes et l'ambiance. Une vitesse plus élevée que celle utilisée dans le cas précédent permet d'obtenir ces réactions. Dans ce cas la pression critique dépend de la charge et de l'ambiance.

Le cas d'un cylindre de laiton glissant à sec dans l'air ambiant sur une surface d'acier [51] et [57], Fig. (19) a fait l'objet d'études approfondies.

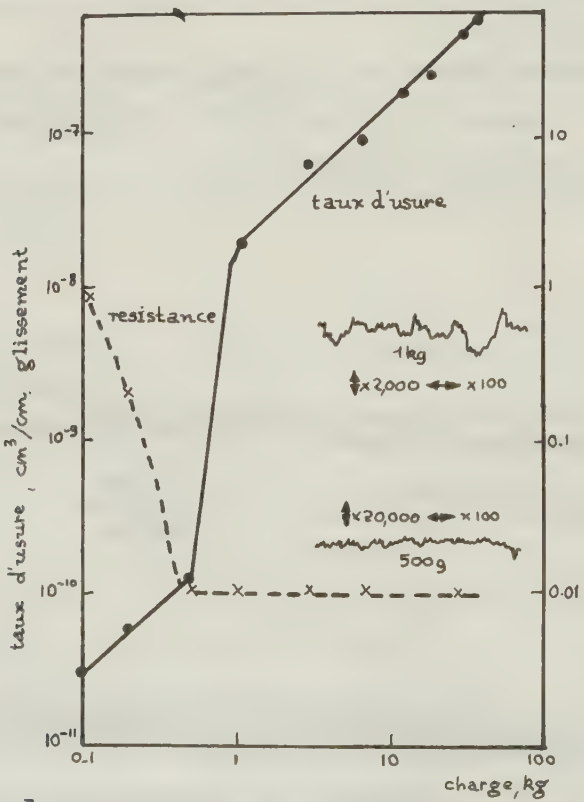


Fig.(19) d'après [57]- Evolution du taux d'usure et de la résistance de contact en fonction de la charge.

Facteurs de l'usure : contact ponctuel : cône sur cylindre - frotteur cônique et piste Ø 25,4 mm - frotteur laiton 60/40 à 2% plomb - piste en stellite grade 20

Vitesse de glissement : 68,5 cm/s

On constate que ce seuil est accompagné de plusieurs modifications. L'état de surface microgéométrique de lisse devient rugueux. La résistance de contact diminue rapidement. Les particules d'usure de fines et oxydées deviennent grosses et métalliques. On dit qu'en dessous de la charge critique l'usure est modérée et qu'au dessus elle est sévère. Ces termes bien qu'imprécis permettent d'identifier deux modes très différents de destruction des surfaces doux et sévère.

De telles courbes illustrent le danger que présentent des pressions exagérées lors du fonctionnement des machines. Si certains seuils sont franchis, le taux d'usure peut être multiplié par 1000, et les surfaces peuvent être irrémédiablement détruites. Ceci montre l'intérêt, pendant le rodage, d'une montée en charge progressive de façon que l'aire réelle de contact s'accroisse de façon progressive sans produire de dommages préjudiciables au bon fonctionnement ultérieur de la machine.

L'existence d'une usure très faible en dessous d'une certaine charge peut être utilisée dans la fabrication des contacts électriques. En effet si on mesure la perte de masse d'un frotteur d'or qui glisse sur une piste d'or [50] on obtient une courbe qui a l'allure de celle qui est tracée sur la Fig.(20)

En dessous d'une certaine charge critique l'usure est nulle. Ce résultat peut être grossièrement prédit par le calcul [50]

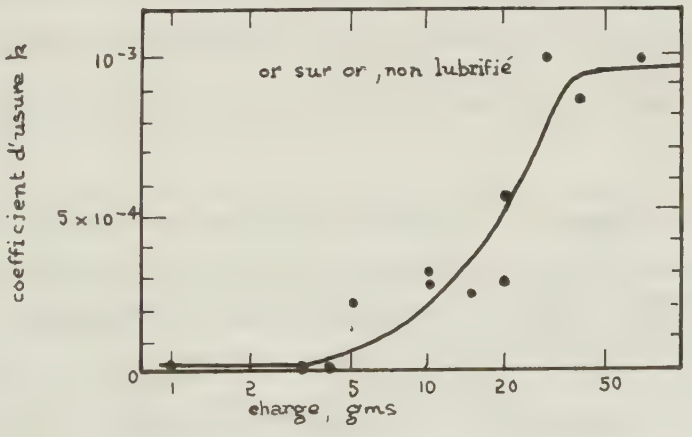


Fig.(20) - Perte de masse système frotteur, piste (or) en fonction de la charge, d'après [50].

Après deux semaines de glissement on ne peut déceler de perte de masse de l'une ou l'autre pièce lorsque la charge est inférieure à 0,05 N.

Dans la fabrication des appareils à contacts électriques frottants sous faible intensité on choisit dans certains cas de fabriquer ces contacts à partir de métaux nobles. Pour augmenter la durée de vie du mécanisme il est préférable de charger sous 0,01 N chacun des 10 contacts en parallèle qu'un seul sous 0,1 N

III-1-4 - Influence de la vitesse de glissement sur la détérioration des surfaces par usure adhésive. (à charge faible)

Le principal effet de la vitesse est d'agir sur la température superficielle, la température maximale atteinte étant celle du métal qui a le plus bas point de fusion . Si la charge faible n'entraîne pas de destructions immédiates cet accroissement de température en surface aura pour effets :

a) de créer des points chauds, ce qui accroît la réactivité des surfaces et des produits d'usure vis à vis du milieu environnant et donne de l'importance à toutes les réactions d'oxydation qui peuvent se produire au cours des glissements dans l'air.

b) les chauffages et refroidissements rapides vont accroître l'importance des changements structuraux et probablement la diffusion de certains éléments. Ainsi dans le cas des aciers on peut trouver des transformations de type martensitique et certaines zones voient modifier leur teneur en carbone.

c) la haute température peut favoriser la diffusion des éléments d'une pièce dans l'autre et la formation d'alliages à l'interface.

d) à haute température, il peut se produire des fusions des zones superficielles.

Ainsi lorsque l'on glisse en présence d'air on observe l'existence de vitesses critiques, à partir desquelles les échauffements superficiels sont suffisants pour provoquer des réactions d'oxydation conduisant à la construction de films d'oxyde qui se reconstituent aussi vite su'ils sont détruits.

Sur la figure (21), on a montré les résultats concernant l'usure du fer lorsqu'il glisse sur lui-même.

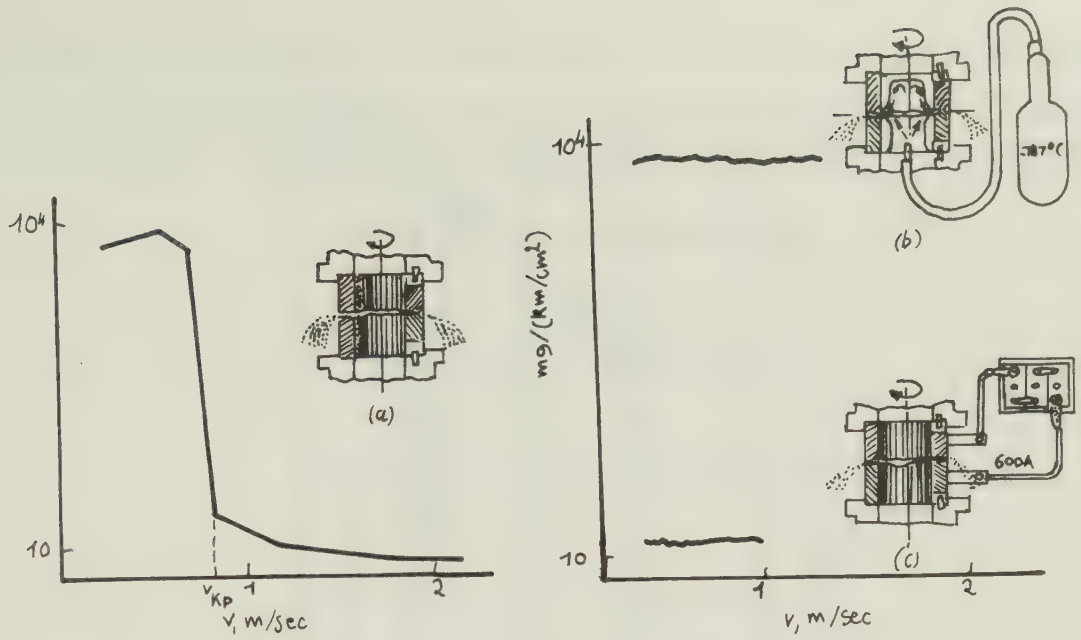


Fig. (21), d'après [59] - Usure, en fonction de la vitesse, du fer armco glissant contre lui-même.

a) dans l'air

b) en présence d'azote liquide

c) lorsque les éprouvettes sont chauffées par effets Joule.

Dans l'air à partir de 0,9 m/s le taux d'usure est divisé par 500. En dessous de cette vitesse critique les surfaces sont endommagées et présentent de grands arrachements. Au-dessus l'arrachement est remplacé par le polissage, à 0,9 m/s le calcul montre que l'élévation de la température superficielle est de 1000° C.

D'autre part on sait que le taux d'oxydation du fer à 900° C, augmente rapidement.

Si on échauffe par effet Joule les éprouvettes glissantes, on observe que le taux d'usure est très faible, même en dessous de la vitesse critique déterminée ci-dessus, tandis que si on les refroidit il reste élevé au dessus de cette vitesse critique.

III-1-5 - Effets combinés de la charge et de la vitesse dans une ambiance oxydante.

Sous les effets combinés de charges et de vitesses qui ne restent faibles ni l'une ni l'autre, il peut se produire des transformations structurales et des oxydations. Dans ce cas on observe l'existence de deux charges critiques P_1, P_2 en fonction de la charge Fig.(22) d'après [60] et [61] .

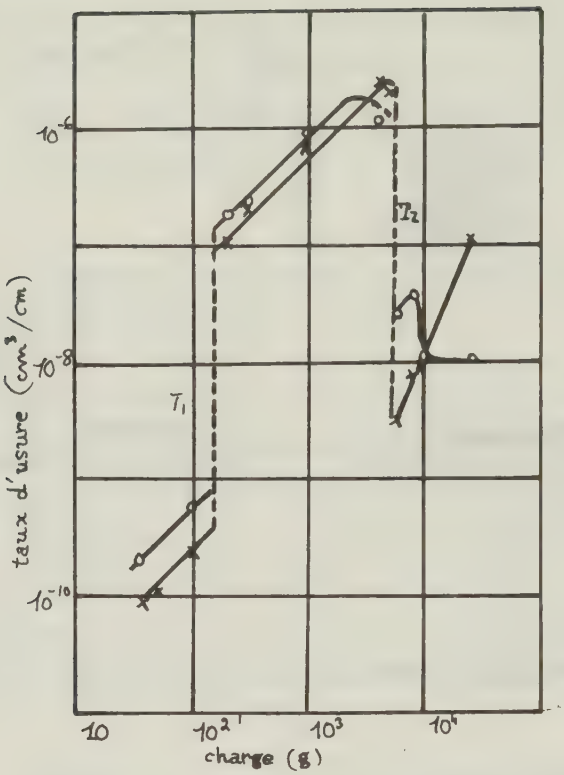


Fig. (22) d'après 60 - Evolution du taux d'usure en fonction de la charge, vitesse de glissement : 1 m/s, x : frotteur

O : disque

Facteurs de l'usure : Contact initial ponctuel par cylindres croisés. Ø frotteur 6,35 mm, piste 2,54 cm. Les états de surface sont obtenus par polissage au papier 600. Les frotteurs et piste sont en acier à 0,52 % de C.

$P < P_1$, et $P > P_2$ l'usure est modérée en régime établi :

$P_1 < P < P_2$ l'usure est sévère.

L'existence de ces seuils est bien dûe à l'oxydation car en présence d'argon P_1 diminue et P_2 augmente. La température éclair est environ 200° C au voisinage de P_1, et 860° C au voisinage de P_2. En faisant croître la vitesse ce qui a pour effet d'augmenter la température superficielle on observe que P_1 et P_2 diminuent Fig. (23).

Des transformations métalliques se produisent simultanément au voisinage de P_1 la principale transformation métallurgique est l'écrouissage de l'acier Les transformations métallurgiques au voisinage de P_2 sont complexes mais elles s'apparentent à des trempes rapides, dans le cas de l'acier à 3 % Cr et 0,3 % C, on peut voir apparaître une couche blanche très dure (1000 Vickers environ) [62]

Et ces transformations pourraient être utilisées pour créer des couches superficielles très résistantes à l'usure. Il reste à déterminer pour chaque type d'acier les conditions de charge et de vitesse permettant d'obtenir de telles couches.

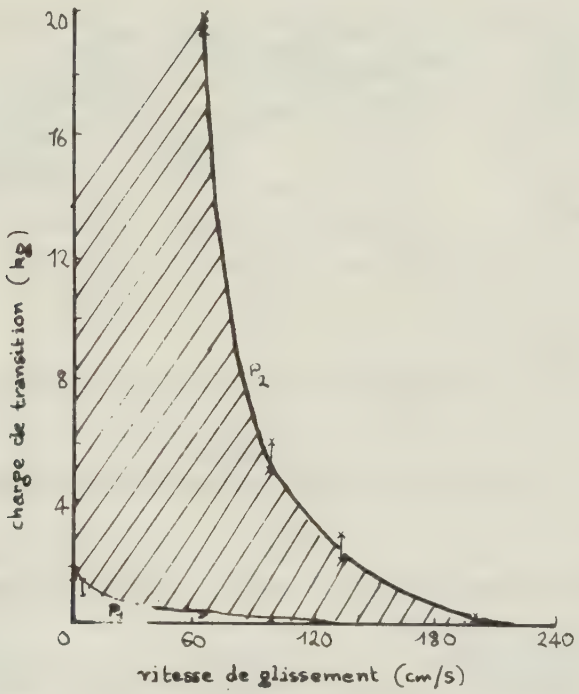


Fig. (23) d'après [60] - Evolution des charges critiques P_1 et P_2 en fonction de la vitesse de glissement. Les facteurs de l'usure sont identiques à ceux qui sont présentés figure (22).

On doit bien noter que l'effet combiné de la charge et de la vitesse peut être modifié par la température et la teneur de l'atmosphère ambiante en oxygène. Ce phénomène a été étudié expérimentalement lors du glissement d'un frotteur de laiton sur une piste d'acier Fig.(24), d'après [63].

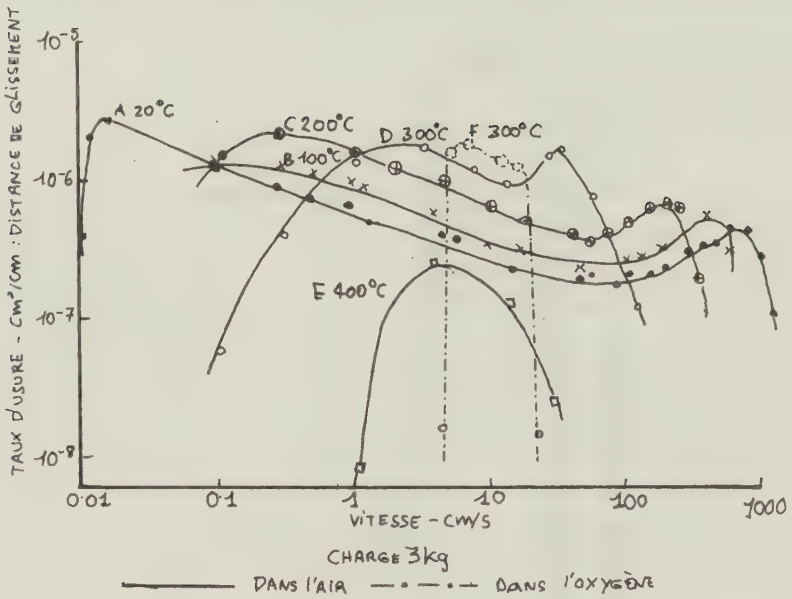


Fig.(24) - Evolution du taux d'usure avec la vitesse à des températures ambiantes différentes, d'après [63] .
Facteurs de l'usure : Contact initial du type ponctuel - frotteur conique, sur piste d'acier, nature des matériaux : laiton 60/40, 2 % Pb, acier 800 Vickers (18 % W, 4,5 % Cr, 1,5 % V, 0,7 % C).

On observe à une température déterminée deux zones de transition formant une zone d'usure sévère dont la largeur diminue quand on augmente la température ambiante. Si à une température donnée, 300° C par exemple, on fait passer un jet d'oxygène sur la zone de contact, on restreint la zone d'usure sévère (courbe F).

Si dans une situation tribologique donnée, lors du glissement dans l'air on étudie l'évolution d'une charge critique en fonction de la vitesse, on s'aperçoit que l'on peut diviser le plan, charge, vitesse en deux régions Fig.(25).

Dans l'une on se trouve en régime d'usure modérée, dans l'autre en régime d'usure sévère.

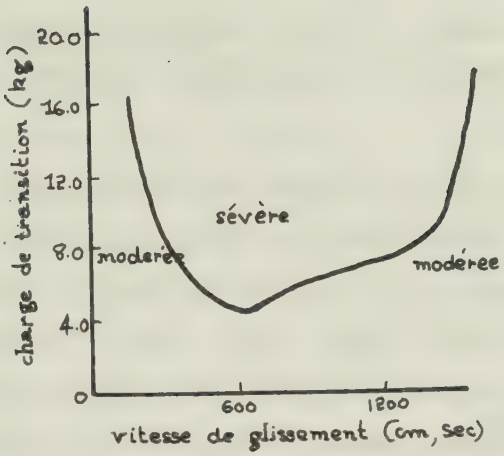


Fig.(25) - Evolution de la charge critique en fonction de la vitesse de glissement dans le cas de la fonte grise, d'après [54] .

- On peut donc conclure en disant que l'usure modérée peut être obtenue par des combinaisons de la charge, de la vitesse et de l'ambiance.

III-1-6 - Influence de l'ambiance sur la détermination des surfaces par usure adhésive.

La perte de masse d'une pièce frottante dépend du nombre de jonctions métalliques et de leur taille. Le milieu ambiant tend à accélérer le phénomène ou à le ralentir suivant qu'il favorise ou défavorise l'existence de jonctions métal-métal et le transfert qui en résulte . Le tableau 1 donne les valeurs possibles du coefficient de transfert k dans différentes ambiances.

	Surf. propre Ultra vide	Sans lub. dans l'air	Mauvais lub. Eau Essence Métal liq. non mouillant	Assez bon lubri. Huile miné. pure Verre fondu Métal liq. mouillant	Bon lubrifiant Huile miné. avec Huile très visqueuse Bon lubrifiant synth.
Métaux identiques	3×10^{-1}	4×10^{-2}	7×10^{-4}	4×10^{-5}	10^{-6}
Métaux non identiques	2×10^{-3}	8×10^{-4}	5×10^{-4}	4×10^{-5}	10^{-6}

Tableau 1 - Valeur du coefficient de transfert dans différentes conditions de contaminations superficielles - D'après Rabinowicz 1967 [64] .

Selon l'environnement, le coefficient de transfert varie de 1 à 100.000 tandis que le coefficient de frottement varie de 1 à 10.

Dans l'ultra-vide et à haute température, des métaux tels que le zirconium, l'acier inoxydable [65] et le titane [45] se soudent dès le début du glissement, même sous faible charge.

Certains gaz peuvent réagir avec des surfaces métalliques en formant des films résistants à l'usure adhésive. Ainsi l'oxygène réagit avec les surfaces métalliques en donnant des films d'oxydes qui souvent diminuent le coefficient d'usure [53] , [54] , [60] , [61] , [59] , [62] , [63] . L'oxygène peut jouer un rôle lorsque le glissement à lieu en présence d'un liquide. Dans l'eau il peut se former de l'eau oxygénée [65 bis] par effet tribochimique . Sous fortes charges on observe une oxydation simultanée de l'acier et des lubrifiants hydrocarbonés. L'usure à sec est moins importante qu'en présence d'un lubrifiant hydrocarboné non oxygéné [66] , [67] , [68] .

Le frottement des organes mécaniques ont lieu en général en présence de lubrifiants liquides. Dont l'un des rôles parmi les plus importants est de diminuer le nombre et la dimension des jonctions métalliques en constituant des films protecteurs et en supportant une partie de la charge [69] à [72] Fig. (26)

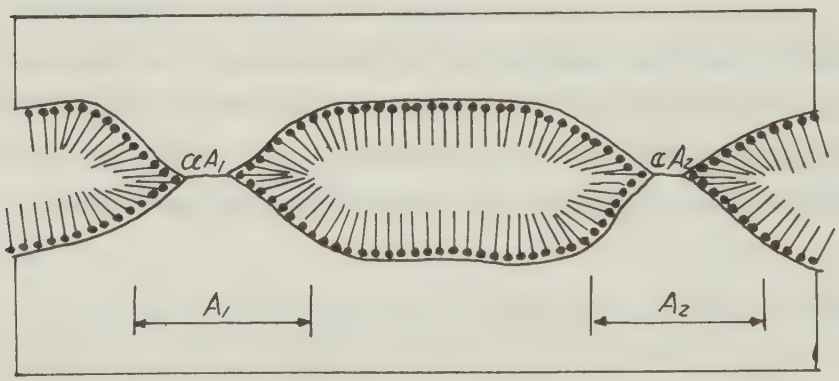


Fig.(26) - Schéma de l'intéraction d'un lubrifiant avec une surface métallique d'après [33] .

Le lubrifiant et ses additifs forment une couche qui s'interpose entre les deux matériaux métalliques pour empêcher le contact direct au niveau des aspérités. Si la charge n'est pas trop forte, la couche protectrice se forme à partir du lubrifiant lui-même qui a une certaine affinité pour la surface. Il s'agit d'un phénomène d'adsorption physique, réversible, mettant en jeu des forces de cohésion faibles entre les molécules adsorbées et les surfaces.

Des hydrocarbures éthyléniques ou aromatiques constituent des couches adsorbées de façon plus énergique que les paraffines [69] et [73]

Dans des conditions de charge et de température plus difficiles, les énergies de liaison entre les hydrocarbures et les surfaces métalliques sont trop faibles ; pour assurer la cohésion de cette couche il faut utiliser des additifs plus solidement adsorbés sur les parois. On trouve ce type d'additifs dans les corps polaires tels que les alcools, acides, savons, esters.

La concentration superficielle en additif devient très grande si on la compare à la concentration moyenne dans le lubrifiant [74] à [76]. On a en fait une sorte de couche solide, comme si l'additif était seul. L'efficacité de cette couche se relie très directement au point de fusion de l'additif pur correspondant. La cohésion de la couche chute complètement à la température de transition qui est en relation avec la température de fusion de l'additif pur.

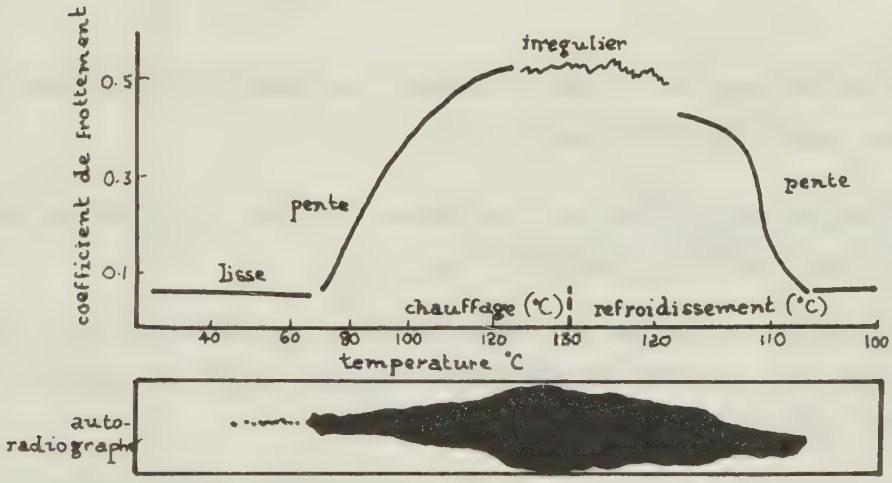
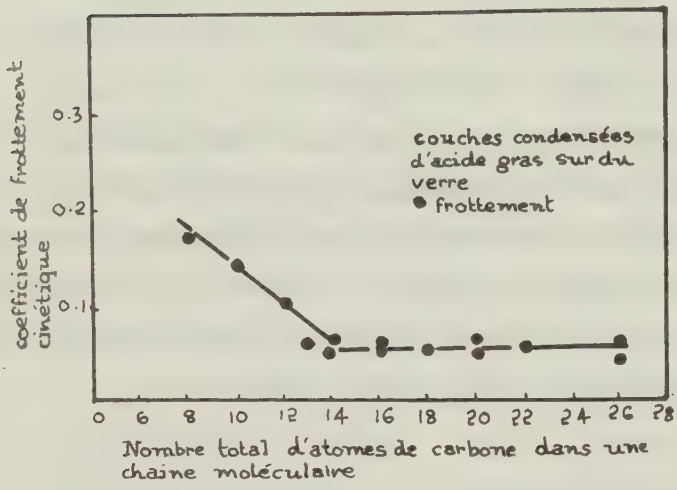


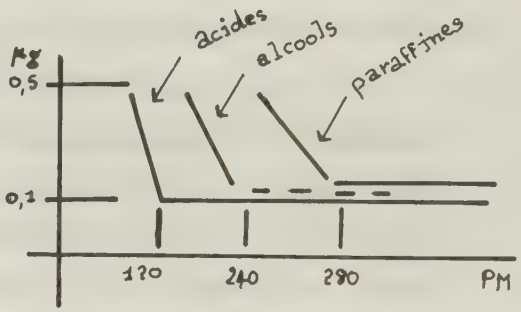
Fig.(27) d'après [77] - Surfaces de cadmium lubrifiées par l'acide palmitique. Le noircissement montre le transfert métallique. En regard est indiquée la valeur du coefficient de frottement.

Ainsi si on étudie le frottement du cadmium lubrifié par l'acide palmitique, on observe l'existence de deux températures critiques Fig.(27). La première correspond au point de fusion de l'acide 69° C, la seconde à la désorption du film lubrifiant 120° C. Le premier transfert important se produit à 69° C et s'aggrave à 120° C.

A l'intérieur d'une même famille, les acides gras par exemple, le coefficient de frottement à une température déterminée (inférieure à la température de transition) dépend de la longueur de la chaîne jusqu'à une certaine limite puis il devient stable Fig.(28) [78] . L'allure de la courbe dépend de la famille chimique Fig.(29) [79] .



28



29

Fig.(28) - Evolution du coefficient de frottement en fonction du nombre total d'atomes de carbone dans une chaîne moléculaire.

Fig.(29) - Evolution du coefficient de frottement en fonction du poids moléculaire pour différentes familles chimiques.

De l'adsorption physique on peut passer à la chimisorption. Les forces de liaison sont plus importantes. La réversibilité des réactions diminue et on obtient des couches très résistantes.

Si les conditions de charge et de températures sont sévères les lubrifiants doivent contenir des additifs dits extrême-pression. Ces derniers servent à limiter les endommagements par une sorte de corrosion contrôlée. On peut citer les additifs chlorés, soufrés, phosphorés. La surface des pièces devient le siège de véritables réactions chimiques avec formation locale de couches de produits de réactions : chlorures, sulfures, phosphates, oxydes [80] et [81] .

Ce qui compte c'est la vitesse de la réaction chimique qui conduit à la formation d'une couche, et la vitesse d'usure de cette couche. Les impuretés jouent un rôle important en tant qu'initiateurs ou relais des réactions chimiques [82]. Les films de chlorures sont très sensibles à l'eau, les films de sulfures le sont beaucoup moins.

D'autres observations ont été faites en comparant l'usure d'un disque rugueux en présence de produits inactifs ou actifs, c'est-à-dire modifiant l'énergie superficielle [83]. Si on mesure le volume perdu en fonction du temps Fig.(30), on observe sur la courbe a (lubrifiant actif) au début un volume usé important qui correspond à la période de rodage, puis la vitesse d'usure, donnée par la pente de cette courbe, diminue et devient constante. La grande vitesse de rodage provient d'un effet de plastification par adsorption. Puis il y a diminution des contraintes parce que la surface se polit. Les rugosités disparaissent et la vitesse d'usure est considérablement abaissée.

La courbe (b) lubrifiant inactif donne initialement une vitesse d'usure plus petite parcequ'il n'y a pas d'action tensio-active du lubrifiant. La rugosité est conservée et la vitesse d'usure reste constante et devient supérieure à la vitesse d'usure dans le cas d'un lubrifiant très actif après le rodage.

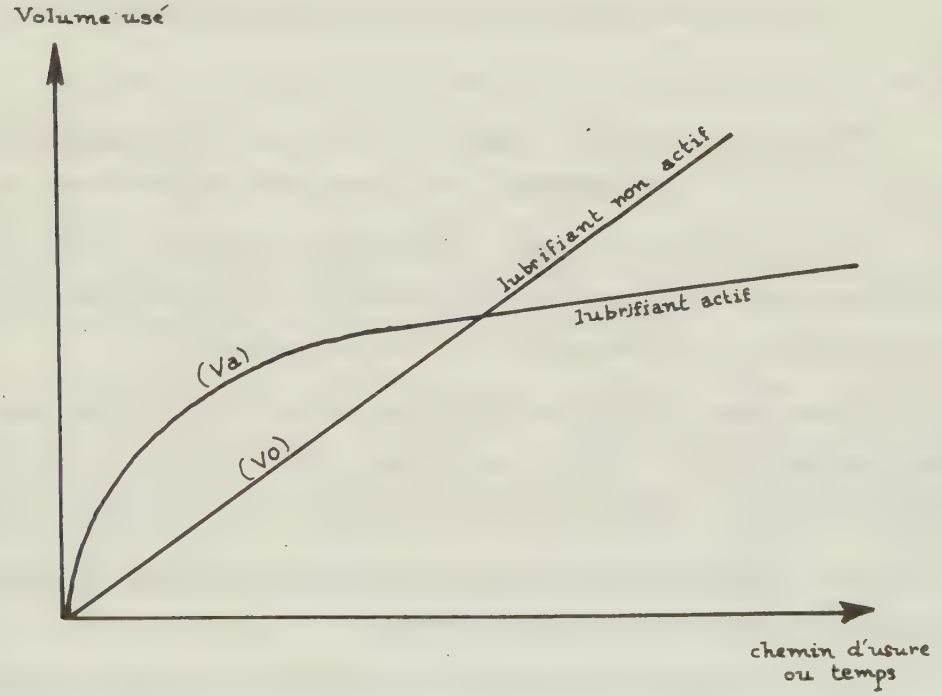


Fig.(30) - Volume perdu en fonction du temps d'après [83].
a) lubrifiant actif
b) lubrifiant non actif

Si maintenant on mesure la vitesse d'usure en fonction de la pression moyenne Fig.(31) on constate qu'il existe une pression critique pour laquelle il y a inversion de l'usure par effet tensio-actif.

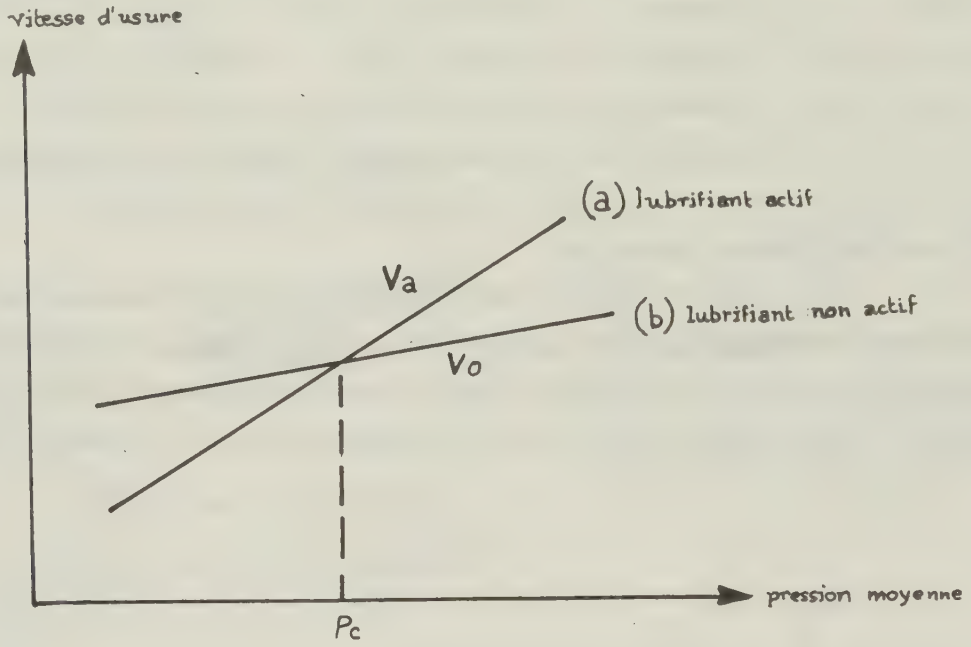


Fig.(31) - Vitesse d'usure en fonction de la pression moyenne en présence d'un lubrifiant actif ou non actif d'après [78].

Donc quand on utilise un lubrifiant actif il ne faut surtout pas dépasser la charge critique sinon la fragilisation par adsorption prend le pas sur la plastification par adsorption et l'usure augmente.

Nous avons vérifié et confirmé la validité de ces conclusions dans le cas du glissement d'un frotteur en bronze (UE 12 P) sur le 1'acier (XC 38) en présence d'huile de vaseline pure ou contenant 0,2 % d'acide oléique [84].

III-1-7 - Influence de la nature et de la structure des matériaux métalliques sur leur résistance à l'usure adhésive.

On a étudié principalement l'influence des deux propriétés suivantes : solubilité du matériau métallique dans le corps antagoniste, et structure cristalline.

A) Influence de la solubilité mutuelle des métaux en contact

Si les métaux en contact sont insolubles aux températures atteintes sur les aspérités pendant le glissement, la résistance mécanique des jonctions est faible [85], [86], [87], [88], [89]. Les études concernant les corrélations entre l'endommagement et la solubilité ont permis de formuler les conclusions suivantes [90]

a) Les métaux mutuellement solubles, lorsqu'ils glissent l'un sur l'autre grippent fortement [69] exemple : Al/Al, Al/Fe, Or/Or. Cette règle n'est pas vérifiée pour des alliages très durs genre stellite.

b) Les métaux mutuellement insolubles ont une bonne résistance au grippage, exemple : Fe/Ag.

c) Les métaux formant des composés intermétalliques ont une résistance acceptable car ils forment des composés fragiles, facilement cisaillables. C'est le cas de l'étain et de l'antimoine avec le fer.

Ces deux dernières règles permettent de recommander les couples de glissement suivants : [88]

- Acier/Argent, Antimoine
- Chrome/Argent, Cadmium, Or
- Molybdène/Argent, Cuivre, Or, Palladium
- Tungstène/Argent, Cuivre.
- Argent/ Cobalt, Rhénium

aux trois règles précédentes il faut ajouter [44]

d) Les métaux doivent avoir des duretés différentes et ne pas former de solution solide.

e) Le métal le plus mou ne doit pas s'écrouir pendant le processus de déformation plastique. Si l'un des matériaux n'est pas écrouissable et complètement insoluble dans l'autre métal, il est possible d'obtenir de bons résultats même si la dureté des métaux en contact est semblable.

On observe que les alliages anti-friction appelés à constituer des pièces frottant contre l'acier satisfont aux conditions énoncées ci-dessus. En effet ces alliages sont considérablement plus mous que l'acier, sont insolubles dans l'acier et ne sont pas écrouissables. Exemples : cadmium et plomb. On trouve aussi des matériaux non écrouissables donnant des composés intermétalliques avec le fer, tels que le zinc ou l'étain. Evidemment c'est selon le même principe, qu'il faut choisir un couple antagoniste devant frotter contre un autre alliage que l'acier

L'intervention de la solubilité peut être modifiée par :

1°) Les transformations physico-chimiques superficielles. Elle est mieux vérifiée dans l'eau que dans l'air [91]. En effet la probabilité de trouver un bon couple de glissement en appliquant cette règle est de 1 fois sur 6 dans l'air à 3 fois sur 5 dans l'eau. Dans l'air la formation d'oxydes et les transformations structurales peuvent prendre le pas sur les phénomènes de solubilité.

2°) Au-delà d'un certain taux de déformation, on peut faire adhérer des métaux insolubles à l'état liquide [92].

Il peut aussi se produire un transfert même lorsque les métaux sont insolubles. Par exemple lorsque les jonctions adhésives ont une résistance à la destruction supérieure à la force de cohésion du métal le plus mou. Ce phénomène a été observé sur les couples suivants : Argent/Fer, Cuivre/Fer.

Si la compatibilité tribologique des métaux purs a fait l'objet de nombreuses études, la compatibilité des alliages n'en est qu'aux premiers balbutiements.

On admet en général que les alliages suivent le comportement de leur constituant prépondérant tant que les éléments d'addition n'atteignent pas des teneurs trop élevées.

Ainsi l'étude de la solubilité du fer dans des alliages Or/Argent, à une température donnée, en faisant varier le pourcentage d'or dans l'alliage, montre l'évolution identique des courbes de solubilité et de quantité d'alliage Or/Argent [93] transférée sur la piste en fer Fig(32).

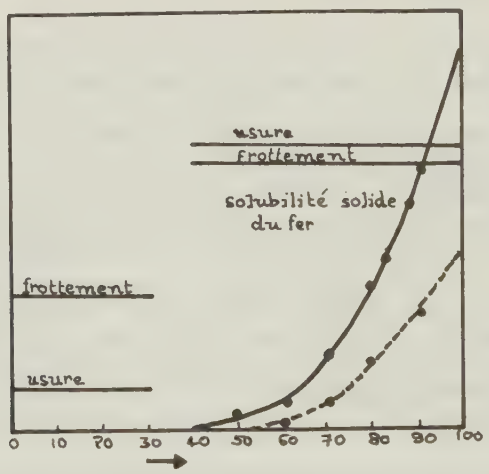


Fig.(32) d'après [93]- Evolution de la solubilité, du transfert, et du frottement en fonction du pourcentage d'or dans l'argent.
Facteurs de l'usure : contact plan sur cylindre - frotteur cylindrique Ø 4 mm, piste cylindrique Ø 75 mm, charge 20 µm, vitesse 2 m/s, ambiance argon, rugosité de l'acier 4 CLA, frotteur alliage, Or, Argent, piste acier SAE 1045, 0,38 % C 0,73 % Mn.

B) Intérêt de la structure hexagonale [94] et [95]

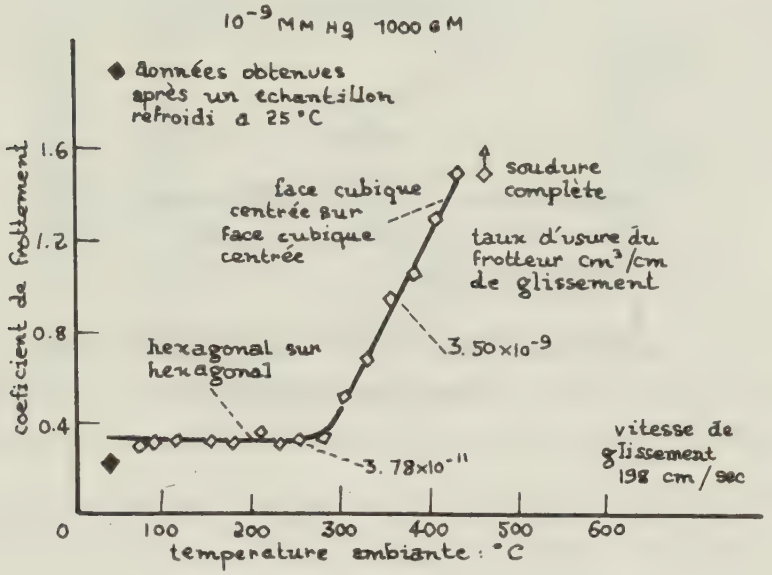


Fig.(33) - Evolution du coefficient de frottement et du taux d'usure en fonction de la température dans le cadre du Cobalt.
Facteurs de l'usure - contact sphère/plan, frotteur cobalt, piste cobalt, ambiance vide 10^{-9} mm de mercure, charge 1000 g. d'après [95]

Le cobalt possède la structure hexagonale jusqu'à une température de 400° C, à partir de cette température il cristallise dans le système cubique. Sur la figure (33) on peut voir que le coefficient de frottement et le taux d'usure s'accroîssent rapidement quand on passe de la structure hexagonale à la structure cubique, à 480° C il se produit une soudure complète des surfaces, cette observation est en accord avec les mesures de coefficient d'adhésion sous vide [96].

La température de transformation de la structure hexagonale en cubique peut être élevée en ajoutant un élément d'alliage tel que le molybdène Fig. (34). En abscisse on a porté la vitesse car on sait que l'accroissement de la vitesse a surtout pour effet d'augmenter la température superficielle.

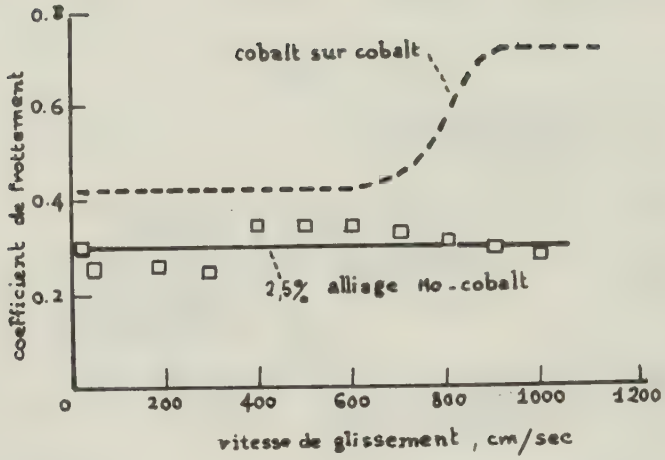


Fig.(34) - Evolution de coefficient de frottement de frotteur en alliage cobalt-molybdène glissant sur des pistes de même matériau à la température de 25° C. Les facteurs de l'usure sont identiques à ceux de la Figure(33). d'après [90]

III-1-8 - Production de particules d'usure libre.

Les particules d'usure libres sont formées, par plusieurs processus, à partir des fragments transférés : oxydation [97], ou fatigue [98].

I - Oxydation -

Si on étudie le cas d'un frotteur "mou" (acier 270 Vickers) glissant sur une piste à 860 Vickers, le circuit de glissement étant fermé, on observe les stades suivants dans le processus de formation de particules libres .

a) Transfert du frotteur sur la piste
b) Constitution, sur la surface de la piste, d'une couche du matériau transféré
c) Oxydation de ce film
d) Enlèvement du film oxydé sous forme de débris d'usure

Les particules libres se forment à partir de la couche transférée comme le montrent les résultats expérimentaux présentés sur la Figure (35).

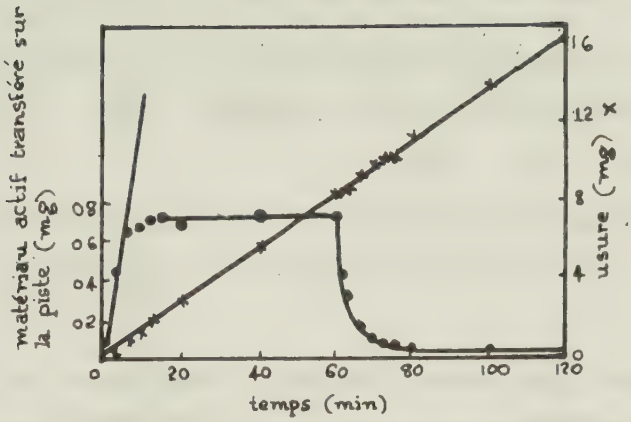


Fig.(35) - Evolution, en fonction du temps, des quantités de particules libres observées directement et de particules transférées (décelées par radioactivité)

Le taux de production des particules libres reste constant, tandis que l'activité du film transféré diminue progressivement lorsque l'on remplace un frotteur radio actif par un frotteur inactif.

L'oxyde formé peu adhérent est enlevé lors des passages successifs d'une zone de la piste sous le frotteur. Le taux d'oxydation règle la perte de masse du frotteur Fig.(35). Cet effet est illustré par la figure(36)

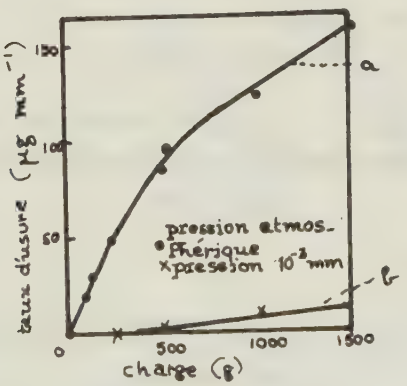


Fig.(36) d'après [98] - Evolution du taux d'usure en fonction de la charge lors d'un glissement dans l'air ambiant (courbe a) ou sous vide partiel (courbe b).

B) - Fatigue -

La génération de particules libres dans le cas du glissement du laiton sur la stellite se fait par un mécanisme de fatigue.

Lors des passages successifs, sous le frotteur d'une particule transférée sur la piste, la jonction est affaiblie puis finit par se détacher, par suite d'un mécanisme de fatigue, sans pour autant adhérer au frotteur.

Rabinowicz a montré par le calcul et l'expérience que la taille des particules libres est proportionnelle au rapport $\frac{W\ 12}{HB}$, H B est la dureté Brinell et $W\ 12 = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12}$.

W 12 est l'énergie nécessaire pour créer d'une manière réversible une unité de surface du matériau 1 et une unité de surface du matériau 2 en détruisant l'interface 1 - 2.

Si on observe les courbes montrant l'évolution de la quantité des particules libres ou transférées au cours du temps Fig.(37) on constate que le transfert atteint une valeur constante ce qui montre qu'il y a équilibre entre l'arrivée des particules sur la couche transférée et le départ des particules d'usure libre (état stationnaire).

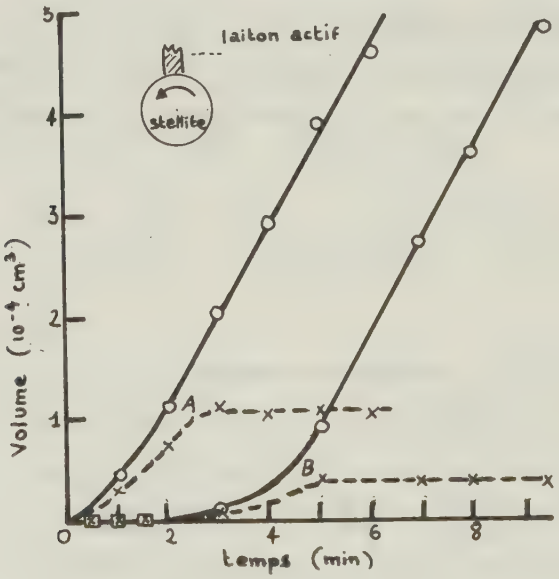


Fig.(37) d'après[37] - Evolution de la quantité de matériau perdu sous forme de particules libres (- 0 —) et transféré.(- x -)

A)Non lubrifié, charge 5 da N

B)Lubrifié au cétane, charge 22,5 da N

Facteurs de l'usure : contact cylindre/cylindre, vitesse de glissement 4,5 cm/s.

et si on remplace un frotteur radioactivé par un frotteur inactif, on observe que l'activité des particules d'usure diminue progressivement, bien que le taux d'usure reste constant Fig.(38), ce qui confirme les résultats présentés Fig.(38), montrant que les particules d'usure libre se forment aux dépens de la couche transférée.

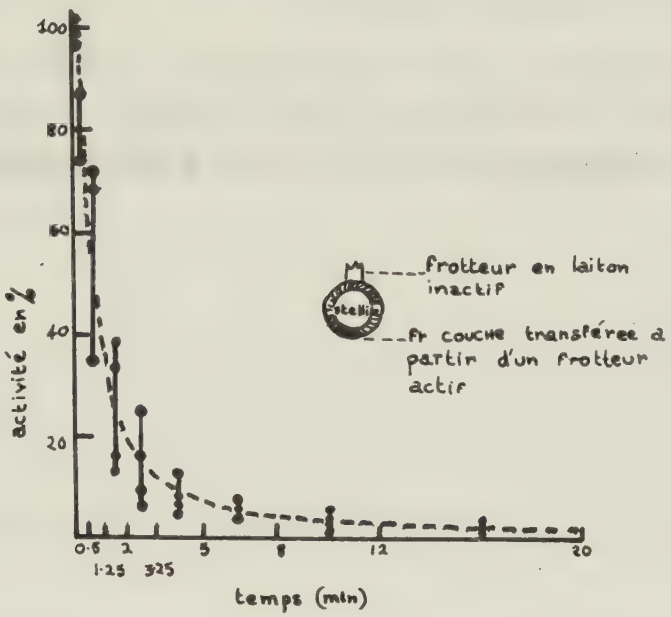


Fig.(38) d'après [97] - Evolution de l'activité des particules d'usure lorsqu'on remplace un frotteur actif par un frotteur inactif : charge 22,5 da N.

Les particules libres ont en moyenne une taille supérieure aux fragments transférés ; eux-mêmes plus grands que les jonctions, ce qui montre leur tendance à l'agglomération.

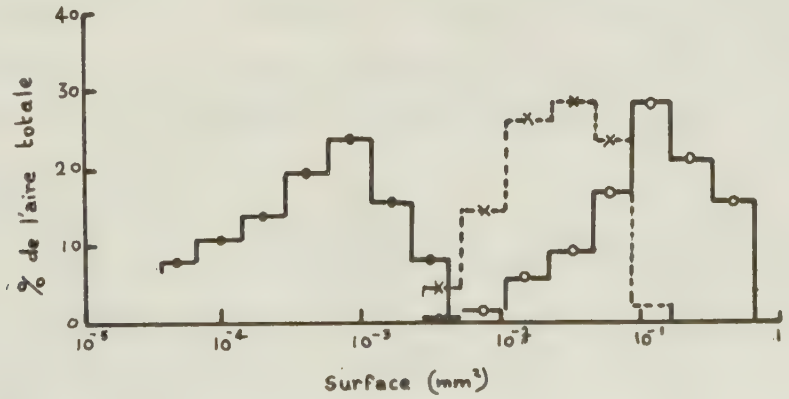


Fig.(39) d'après [97] - Comparaison de la taille des jonctions (- • -), des particules transférées (- x -) et des particules libres (- o -), facteurs de l'usure identiques à ceux de la Fig.(35) en glissant à sec sous une charge de 2,5 da N.

III-1-9 - Conclusions

Si on veut dans une situation tribologique donnée, diminuer l'usure adhésive on peut : choisir des matériaux mutuellement insolubles, le plus mou n'étant pas écrouissable, régler la charge et la vitesse pour être en régime d'usure modérée, utiliser un lubrifiant efficace c'est-à-dire pouvant former un film évitant les contacts métal/métal.

Au contraire, si on veut accroître l'adhésion, par exemple dans le cas de la soudure par friction, il faut utiliser des matériaux mutuellement solubles, non oxydés et glisser sous vide à haute température sous forte charge.

III-2 - Détérioration des surfaces par abrasion, Usure abrasive

III-2-1 -Définition et principe

Dans le glossaire de l'O.C.D.E.[99] l'usure abrasive est définie comme étant "l'usure par déplacement de matière, produite par des particules dures ou des protubérances dures". Les particules dures peuvent se trouver entre les deux surfaces en mouvement relatif ou être encastrées dans l'une des surfaces.

L'usure abrasive se manifeste par des polissages, des griffures, des arrachements de copeaux. Les conditions principales d'obtention de l'abrasion sont les suivantes :

a) Les particules abrasives doivent être plus dures que la surface abrasée. L'usure abrasive se produit facilement si la dureté Vickers des particules est une fois et demie celle de la surface usée[100].

b) La particule doit avoir des coins ou des angles aigus et être convenablement orientée.

Résumons les principaux résultats expérimentaux présentés dans la littérature concernant l'usure abrasive. On présente les effets des paramètres suivants : orientation géométrique, taille des particules abrasives, abrasion en circuit ouvert ou fermé, charge, vitesse, environnement, nature des matériaux. Bien entendu il est difficile d'interpréter l'effet d'un facteur si les autres ne sont pas précisés.

III-2-2 - Effet de l'orientation géométrique des particules abrasives.

La condition b est mise en évidence par l'expérience fondamentale suivante : Une tige à pointe pyramidale raye sous une charge suffisante la surface plane d'un échantillon métallique Fig.(40). Le déplacement de la tige s'effectue parallèlement à la surface. On trace la courbe montrant l'évolution de la section droite de la rayure en fonction de l'angle d'inclinaison a de la face d'attaque du frotteur par rapport au plan Fig.(41). On observe à partir d'un certain angle critique, une augmentation brusque de la largeur de la rayure correspondant à l'apparition d'un copeau. On passe du repoussage à l'usinage, c'est-à-dire à la déformation par rayure à la production d'un copeau.

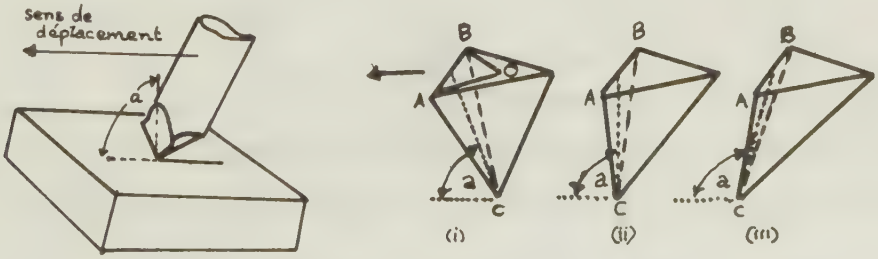


Fig.(40) d'après [101]- a) Schéma utilisé pour simuler l'action d'une particule abrasive.

b) Forme de la pointe A $\hat{C}$ B = 90°

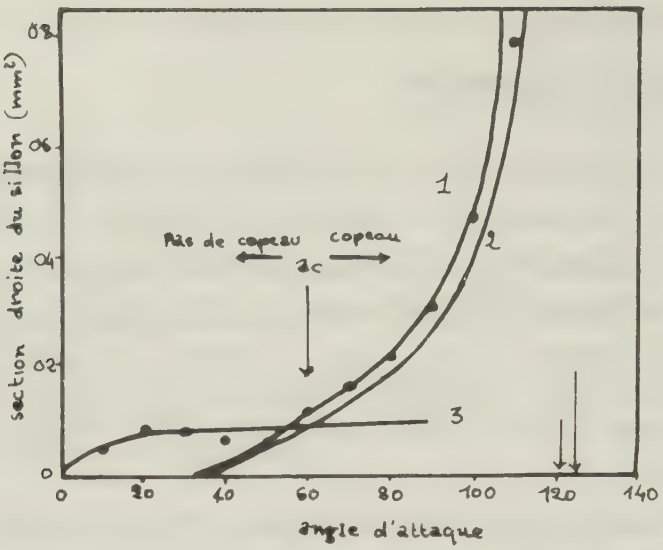


Fig.(41) d'après[101] - Evolution de la section droite du sillon en fonction de l'angle d'attaque. Les courbes 1 et 2 sont tracées à partir de la formule (1) en donnant à f les valeurs 0,6 et 0,7 respectivement. La courbe 3 est tracée à partir de la formule (2). Les valeurs expérimentales mesurées sont représentées par des cercles noirs.

Facteurs de l'usure : Charge 2 N, vitesse d'abrasion 0,5 mm/s, frotteur carbure de tungstène, piste en plomb.

Les auteurs ont établi par le calcul les formules donnant l'aire de la section droite A de la rayure.

1°) Quand il y a production d'un copeau on utilise la théorie de la coupe de Merchant[103] dans laquelle on considère que le copeau est en équilibre stable sous l'action d'un système de forces qui est représenté Fig.(42) En supposant que $Fv = P$ et que $FH = cH_M A$ comme $f = \frac{FT}{NT}$

il vient : $A = \frac{P}{CH_M} \left(\frac{1 + f\ tg\ \gamma}{f - tg\ \gamma}\right)$

formule dans laquelle : P est la charge, C une constante géométrique, H_M la dureté de Meyer[100], f le coefficient de frottement.

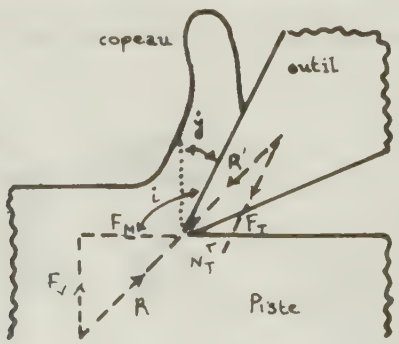


Fig.(42) - Forces agissant sur un outil d'après[103].

2°) Quand il y a formation d'une rayure sans enlèvement de métal la force de frottement est la somme de deux termes. Le premier représente la force nécessaire pour cisailler les jonctions superficielles, le second la force nécessaire pour produire une rayure.

La largeur de la rayure dans ce cas est donnée par la formule

$$A = \frac{f\ P}{c\ \tau\ \cot g\ i + c H_M}$$

dans laquelle τ est la résistance au cisaillement du matériau de la piste.

L'angle critique correspond à l'intersection de ces deux courbes. Son existence a été observée sur un matériau non écrouissable comme le plomb et sur un matériau écrouissable comme le cuivre .

L'existence de cet angle critique explique le fait que seulement une partie des particules abrasives fixées sur une toile ou un papier abrasif soit correctement orientée pour couper. Les autres particules ne font que des rayures. La figure (43) montre la courbe de distribution des angles d'attaques des particules abrasives d'un papier abrasif.

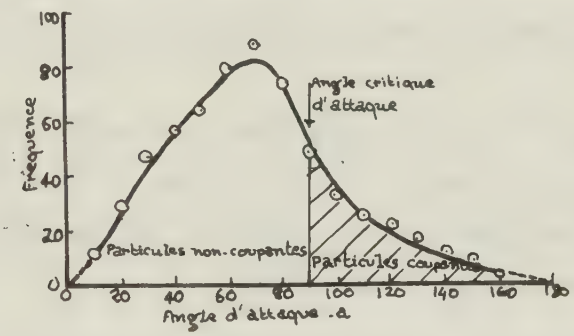


Fig.(43), d'après[101] - Courbe de distribution des angles d'attaque des particules d'un papier abrasif.

III-2-3 - Effet de la taille des particules abrasives sur l'abrasion des métaux.

Si on étudie l'effet de la taille des particules abrasives sur l'abrasion des métaux, on observe, pour une charge donnée, 2 parties principales linéaires sur la courbe qui représente le phénomène Fig.(44) [108] . Pendant la première partie, la perte de masse augmente rapidement quand la taille moyenne des particules croît de 35 à 70 μm , puis au-delà de 150 μm la croissance est beaucoup plus lente. L'existence de particules d'usure diminue l'efficacité des particules abrasives d'autant plus que les particules abrasives sont plus petites

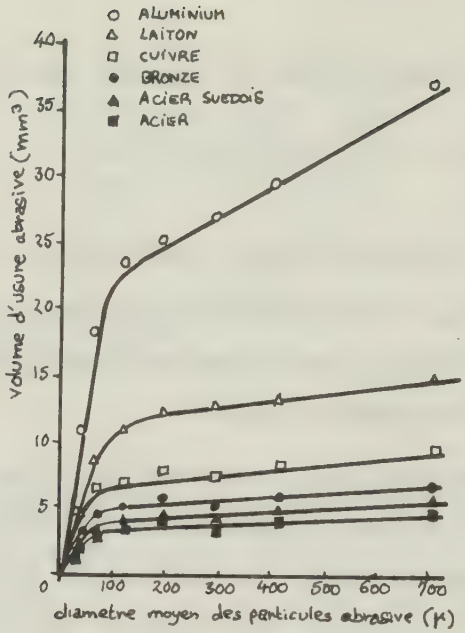


Fig.(44)- Evolution de la perte de masse en fonction du diamètre moyen des particules abrasives. Le frotteur se déplace sur un circuit ouvert de 6 m de longueur.

Facteurs de l'usure : contact plan/plan, frotteur cylindre 5 mm de diamètre, piste toile abrasive, charge 2 da N, vitesse 0,5 m/s. La nature des frotteurs est indiquée sur la figure. Les particules abrasives en carbure de silicium sont fixées sur une toile, d'après [108]

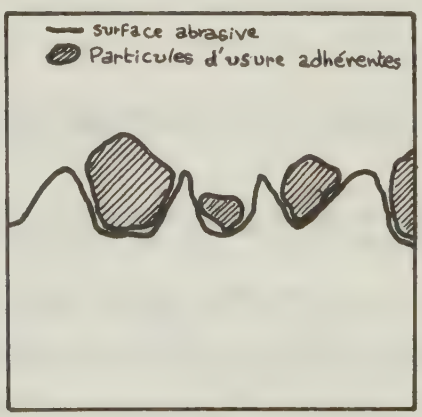


Fig.(45) - Inclusion de débris d'usure entre les particules abrasives de petite taille (inférieure à 70 μm) d'après [110]

La différence de pente entre les parties I et II des courbes de la figure (44) augmente avec la charge comme on le voit sur la figure (46). Pour des faibles charges l'usure abrasive est presque indépendante de la taille des particules. Il en résulte que si on veut faire des essais comparatifs de résistance des métaux à l'usure abrasive, il faut que la charge soit faible, par exemple : 5 N et la taille des particules grande (200 μ m).

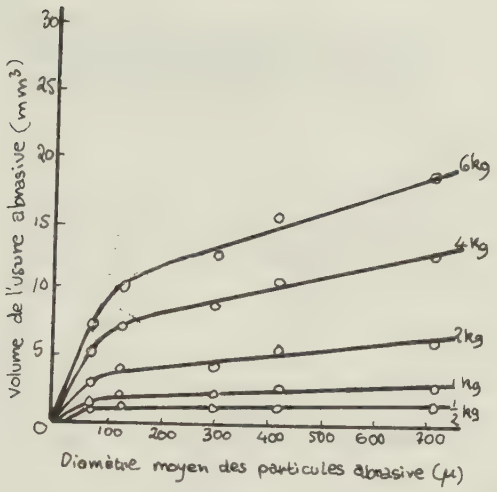


Fig.(46)- Evolution de la perte de masse de frotteurs en acier en fonction du diamètre moyen des particules abrasives pour des charges différentes comprises entre 0,5 et 6 da N. Les autres facteurs de l'usure sont identiques à ceux inscrits Fig.(44) d'après [108]

III-2-4 - Comparaison entre l'abrasion en circuit ouvert et fermé.

En circuit ouvert la perte de masse par abrasion croît linéairement avec la distance d'abrasion, car le frotteur rencontre une surface fraîche dont les caractéristiques sont constantes Fig.(47). En circuit fermé les particules abrasives s'écrouissent Fig.(48) et les débris d'usure tendent à s'accumuler entre les particules abrasives Fig.(45) ce qui fait que l'abrasion diminue et finit par devenir très faible après plusieurs passages Fig.(49). De plus les particules abrasives peuvent s'enfoncer dans le frotteur et accroître sa dureté superficielle [107]

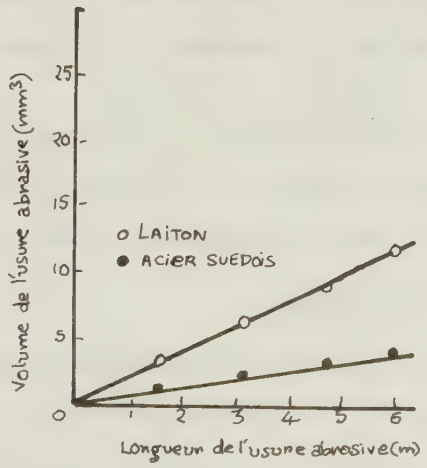


Fig.(47)- Evolution de la perte de masse par abrasion en fonction de la distance d'abrasion en circuit ouvert. D'après [108]
Facteurs de l'usure identique à ceux inscrits Fig.(44)

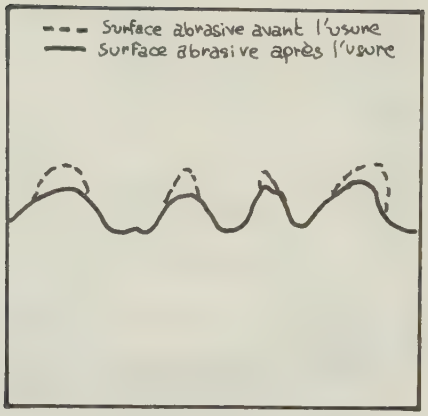


Fig.(48)d'après[110] - Schéma de détérioration des particules abrasives sous l'effet des passages successifs sous le frotteur.

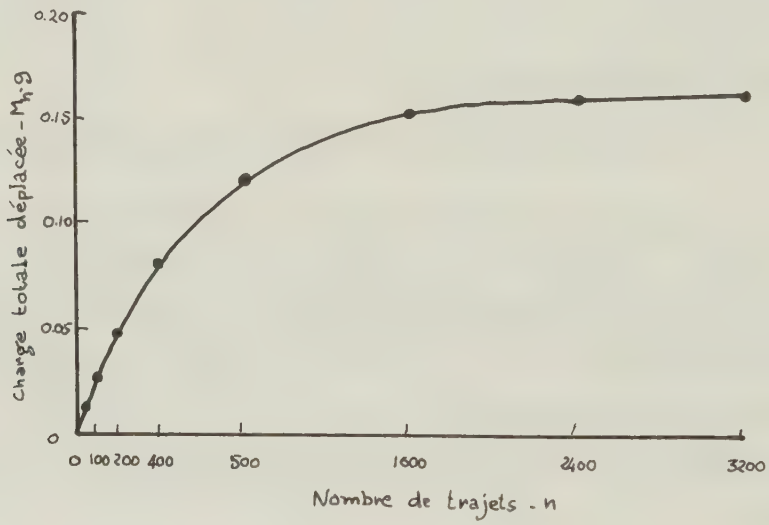


Fig.(49) d'après[101]- Evolution en circuit fermé de la perte de masse par abrasion en fonction du nombre de passages d'une zone du papier abrasif sous le frotteur.
Facteurs de l'usure : contact plan/plan, frotteur cylindrique 6 mm, piste papier abrasif, vitesse 1,6 m/s, frotteur en acier, les particules abrasives en carbure de silicium de diamètre moyen 50μ_m sont fixées sur un support en papier.

III-2-5 - Influence de la charge.

Pour un grand nombre de matériaux la perte de masse est une fonction linéaire croîssant avec la charge Fig.(50). Pour les fortes charges, cette observation n'est plus valable car les particules abrasives s'enfonçent trop profondément dans le frotteur et sont déchaussées sous l'effet du déplacement du frotteur, ce qui entraîne la détérioration de la toile abrasive et la diminution de l'usure abrasive du frotteur.

La non linéarité est influencée par la taille des particules abrasives. Pour des particules dont la taille varie de 70 µm à 125 µm elle est observée à partir d'une charge de 2 da N.

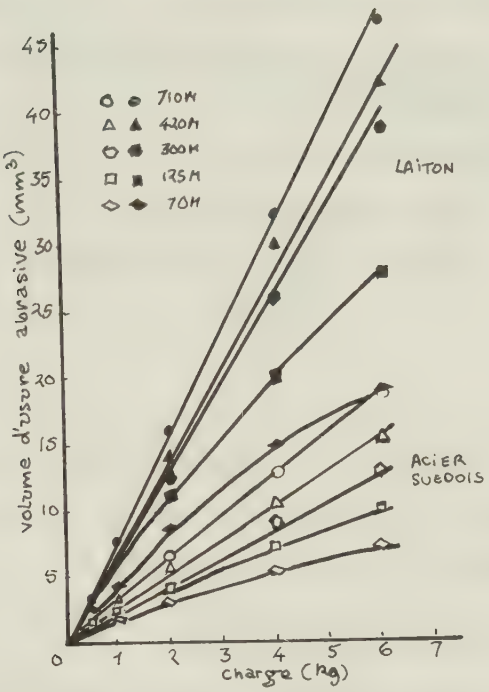


Fig.(50) d'après [108]- Evolution de la perte de masse par abrasion en fonction de la charge. L'abrasion a lieu en circuit ouvert sur une longueur de 6 m les facteurs de l'usure sont identiques à ceux de la figure (44.) Les chiffres M indiquent les dimensions des mailles des tamis servant à trier les abrasifs.

III-2-6 - Influence de la vitesse.

La perte de masse par abrasion augmente légèrement avec la vitesse d'abrasion figure (51). Cet accroissement est attribué à une baisse des caractéristiques mécaniques sous l'effet de l'échauffement provenant de l'accroissement de la vitesse.

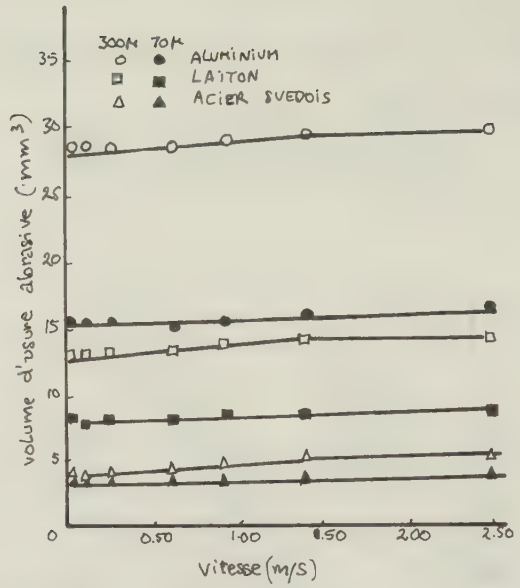


Fig.(51) d'après [110]- Evolution en circuit ouvert de la perte de masse par abrasion pour différents métaux en fonction de la vitesse. Les facteurs de l'usure sont identiques à ceux de la Fig.(44)

III-2-7 - Influence de l'ambiance.

Un liquide a pour effet de chasser les débris d'usure, ce qui favorise la conservation de l'efficacité des particules abrasives [106]. La vapeur d'eau aurait le même effet [106] ce qui explique que la perte de masse par abrasion croît quand l'humidité ambiante augmente Fig.(52). En particulier l'usure par abrasion est plus forte (10 à 20 %) en été qu'en hiver.

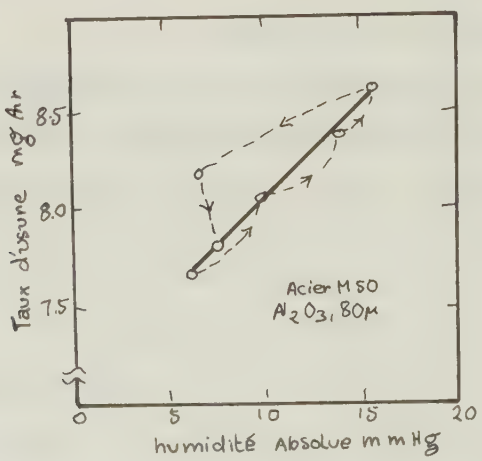


Fig.(52) d'après [110]- Evolution de la perte de masse par abrasion en fonction de l'humidité ambiante. Les flèches indiquent la succession des expériences. Quand l'humidité est réduite brutalement les grains d'abrasifs restent humides et le taux d'usure reste élevé. Dans le cas du glissement métal sur métal l'un des rôles du lubrifiant est de chasser les débris d'usure qui restent entre les deux pièces et de les éliminer par filtrage.

III-2-8 - Influence de la nature des matériaux.

A) Métaux abrasés -

La résistance à l'usure abrasive est une fonction linéaire croîssante de la dureté Fig.(53) [110]. Le coefficient de proportionalité n'est pas le même pour les métaux purs et les aciers.

Sur la figure (53) on a porté la résistance relative à l'usure qui est le rapport de l'usure linéaire d'un échantillon standard $\mathcal{U}_s$ à celui de l'échantillon étudié $\mathcal{U}_e$

$$\varepsilon = \frac{\mathcal{U}_s}{\mathcal{U}_e}$$

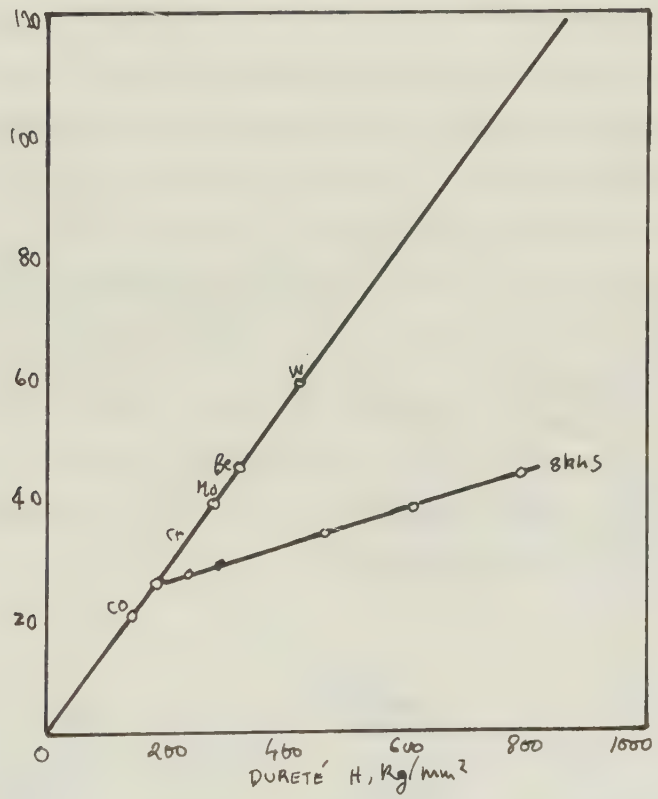


Fig.(53) d'après [111] - Evolution de la résistance à l'usure pour des métaux purs et un acier à 0,83 % de C, ayant subi différentes températures de revenu.

Si on cherche à augmenter la résistance à l'abrasion en accroîssant la dureté on observe que le meilleur résultat est obtenu en incorporant à l'acier des éléments d'alliages Fig.(54). Ce résultat a une grande importance économique.

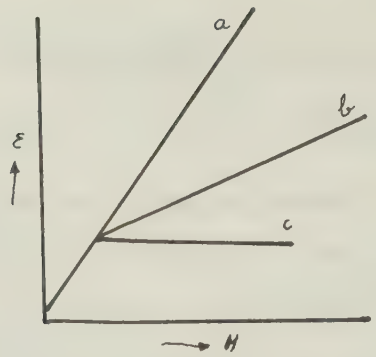


Fig.(54) d'après [111] - Evolution de la résistance à l'abrasion en fonction de la dureté, obtenue

a) addition d'éléments d'alliages

b) trempe et revenus

c) écrouissage

Dans le cas du glissement métal sur métal il est souhaitable que les couches superficielles aient la plus grande dureté possible pour résister à l'action des particules abrasives. Si cette condition ne peut être remplie, par exemple dans le cas d'un arbre dur glissant sur un coussinet mou, il est nécessaire que la pièce molle ait une dureté inférieure au moins de 3 à 4 fois à celle de la pièce dure [106]. En effet dans ces conditions les débris d'usure qui peuvent se comporter comme des particules abrasives peuvent s'enfoncer dans la pièce molle sans détériorer la pièce antagoniste. La figure (55) montre l'enfoncement schématique d'une particule dure dans un matériau mou. Plus le coussinet sera mou plus le rapport $\frac{A_2}{A_1}$ sera grand. A_2 et A_1 étant les empreintes imprimées par la particule dure dans les deux pièces.

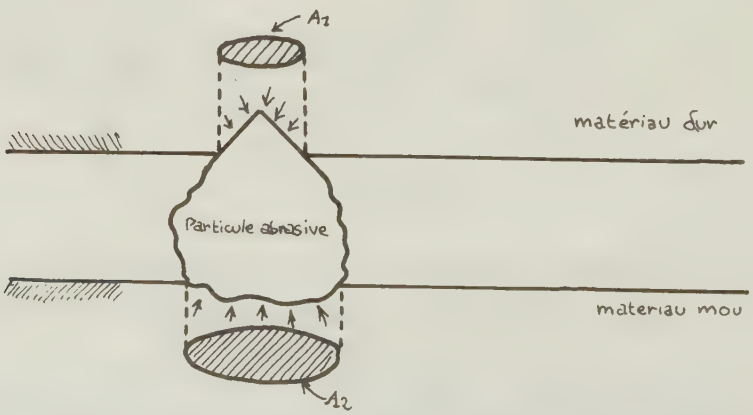


Fig.(55) d'après [110] - Schéma d'enfoncement d'une particule dure dans une pièce dure et une pièce molle.

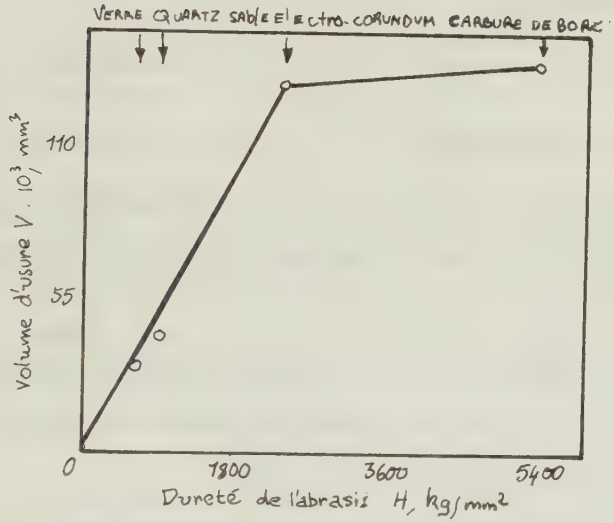
B) Influence de la dureté de l'abrasif -

La courbe montrant l'évolution de la perte de masse par abrasion d'un frotteur en acier en fonction de la dureté de l'abrasif Fig (56) comporte plusieurs parties.

1°) Tant que la dureté de l'abrasif est inférieure ou égale à celle de la pièce abrasée la perte de masse est très faible. L'abrasif est écrasé et ses qualités d'outil coupant disparaissent rapidement.

2°) Quand la dureté croît d'une valeur égale à celle du matériau abrasé jusqu'à 2300 da N/mm^2 la perte de masse par abrasion croît très rapidement. L'abrasif devient de plus en plus résistant.

3°) A partir de 2300 da N/mm^2 la perte de masse du frotteur est presque indépendante de la dureté de l'abrasif qui conserve ses qualités de dureté et et de forme.



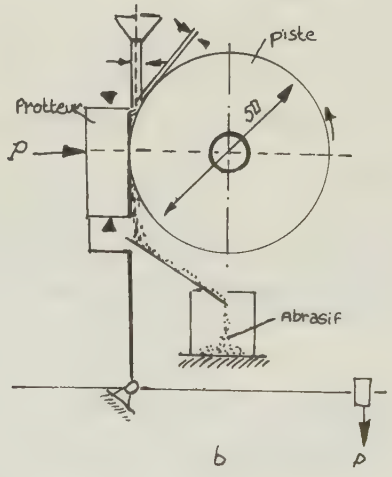


Fig.(56) - Evolution de la perte de masse par abrasion d'un frotteur en acier en fonction de la dureté de l'abrasif, la vitesse est de 4 m/mn. D'après [112]

Un matériau abrasif doit conserver le plus longtemps possible sa forme et sa dureté pour maintenir un taux d'usure constant pendant un long usage. Le tableau 1 donne la liste et la dureté des abrasifs les plus communément utilisés.

Tableau 2

Matériaux utilisés comme abrasifs [112]

MATERIAU	COMPOSITION	DURETE da N/mm^2
Diamant	C	8000
Carbure de Bore	B_4C	8750
Carborundum, carbure au silicium	SiC	2500
Carbure de Titane	TiC	2450
Corindon, alumine	Al_2O_3	2100
Carbure de Zirconium	ZrC	2100
Carbure de Tungstène	WC	1900
Garnet	$Al_2O_3.3FeO.3SiO_2$	1350
Zircone	ZrO_2	1150
Quartz, Silice, Sable	SiO_2	800
Verre	Silicate	500

III-2-9 - Remarque concernant le polissage

L'un des effets du polissage est d'améliorer l'état de surface géométrique du frotteur, plusieurs hypothèses ont été formulées pour expliquer cette amélioration d'état de surface.

a) Les parties hautes de la surface fluent vers les parties basses qu'elles finissent par combler [113]. Ce fluage est favorisé par les hautes températures atteintes localement au cours du polissage [114]

b) Les parties hautes disparaissent par suite d'un mécanisme d'arrachement moléculaire [115] .

c) Le polissage serait une abrasion par de petites particules (quelques μm de diamètre) sous faible charge. L'utilisation de la microsonde à balayage a montré que les surfaces obtenues sont finement rayées et qu'il se produit de petits copeaux sur certaines rayures [116] la Fig.(57) illustre ce mode d'action.

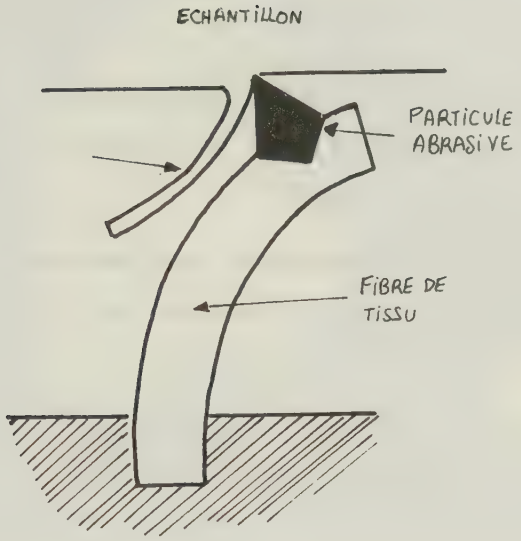


Fig.(57) d'après [116] - Schéma illustrant le mode d'action d'une particule abrasive pendant le polissage.

III-2-10 - Conclusions

Pour lutter contre l'usure abrasive il faut utiliser des matériaux durs dont la dureté devrait être supérieure à celle des particules abrasives, et éventuellement diminuer la charge. Dans le cas du glissement métal/métal si l'une des pièces est plus molle à la fois que l'antagoniste et les débris d'usure, il faut que sa dureté soit au moins 3 ou 4 fois plus faible que celle de la pièce dure, pour que les particules d'usure qui ne sont pas chassées par le lubrifiant puissent s'enchasser dans la pièce molle. Le lubrifiant aura pour rôle de chasser les débris d'usure de la zone de glissement et un filtrage efficace permettra de les éliminer du circuit de lubrification.

Si on veut favoriser l'abrasion il faut des grains durs d'une taille suffisante et opérer en circuit ouvert en présence d'un lubrifiant ou d'un fluide qui enlève les particules d'usure de la zone d'abrasion.

III-3 - Détérioration des surfaces par érosion, Usure érosive.

III-3-1 - Définition et principe

Le glossaire de l'O.C.D.E. [99] définit l'usure par érosion comme la perte de matière d'une surface solide due au contact avec un fluide en mouvement relatif contenant des particules solides.

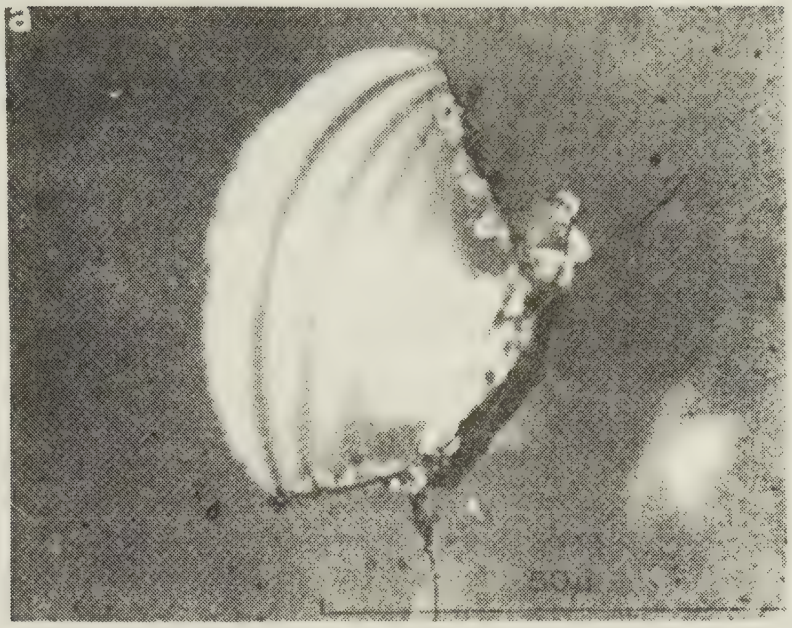
L'usure érosive se manifeste sur les matériaux fragiles par des éclats et des fissures et sur les matériaux ductiles par des piqûres, des polissages, des rayures et des copeaux - Planche (1).

Les mécanismes d'enlèvement de particules d'usure ont été peu étudiés, c'est pourquoi nous présentons les principaux résultats expérimentaux concernant l'usure érosive en étudiant les effets des facteurs suivants : angle d'attaque, diamètre des particules érosives, vitesse des particules érosives, dureté des matériaux érodés.

III-3-2 - Influence de l'angle d'attaque

D'une façon générale on considère que la perte de masse par érosion est la somme de deux termes : La perte de masse par déformation et la perte de masse par effet de coupe [117], [118], [119]. La première se produit quand la particule érosive frappe la surface selon la direction de la normale ($\alpha = 90°$), la seconde lorsque la particule fait un angle aigu avec la surface ($\alpha < 90°$). La figure (58) montre comment est défini l'angle d'attaque .

Fig. (58) - Définition de l'angle d'attaque d'une particule érosive.



1

2

Planche 1 - destruction d'une surface d'un échantillon en verre, angle d'impact 90°
2 - destruction d'un échantillon d'acier à 11 % de Cr ductile, angle d'impact 30°

Facteurs de l'usure : particules de quartz de 150 μm frappant la surface à la vitesse de 100 m/s

Les différents auteurs qui ont cherché à écrire des formules traduisant la perte de masse d'un échantillon par érosion considèrent que la composante normale de la vitesse du centre de gravité de la particule contribue à l'érosion par déformation et la composante tangentielle à l'érosion par effet de coupe. Les formules (1) et (2) rappelées ci-dessous sont les plus utilisées lorsque l'on veut calculer le volume V qu'un échantillon perd par érosion.

Dans ces formules :

W_d est l'énergie cinétique absorbée par la surface lorsque l'on veut enlever une unité de masse par déformation.

W_c est l'énergie cinétique absorbée par la surface lorsque l'ont veut enlever l'unité de masse par effet de coupe.

U_p est la composante normale de la vitesse en dessous de laquelle on n'observe pas d'érosion avec certains matériaux durs.

U_T est la vitesse tangentielle résiduelle de la particule érosive après le choc.

α_o : valeur de α pour laquelle $U_T = 0$

n défini par la relation $\sin n\alpha_o = 1$

$$(1)\quad V = \frac{1}{2} M \left(\frac{U^2 \cos^2 \alpha - U_T^2}{W_c} \right) + \frac{1}{2} M \left(\frac{U \sin \alpha - U_p^2}{W_d} \right) \quad \alpha < \alpha_o$$

d'après [114]

$$(2)\quad V = \frac{1}{2} M \left(\frac{U^2 \cos^2 \alpha}{W_c} \right) + \frac{1}{2} M \left(\frac{U \sin \alpha - U_p^2}{W_d} \right) \quad \alpha > \alpha_o$$

La figure (59) montre l'évolution de la perte de volume par érosion en fonction de l'angle d'attaque pour différentes valeurs numériques du rapport $\frac{W_c}{W_d}$, en commençant par des matériaux ductiles (59a) pour finir par des matériaux fragiles (59 d).

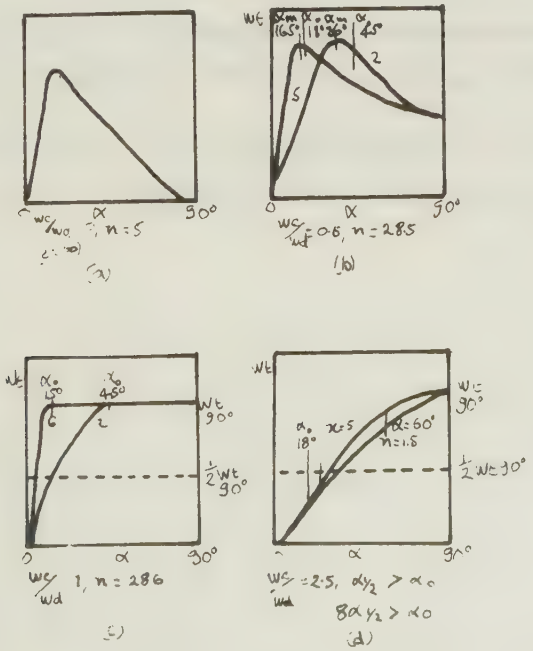
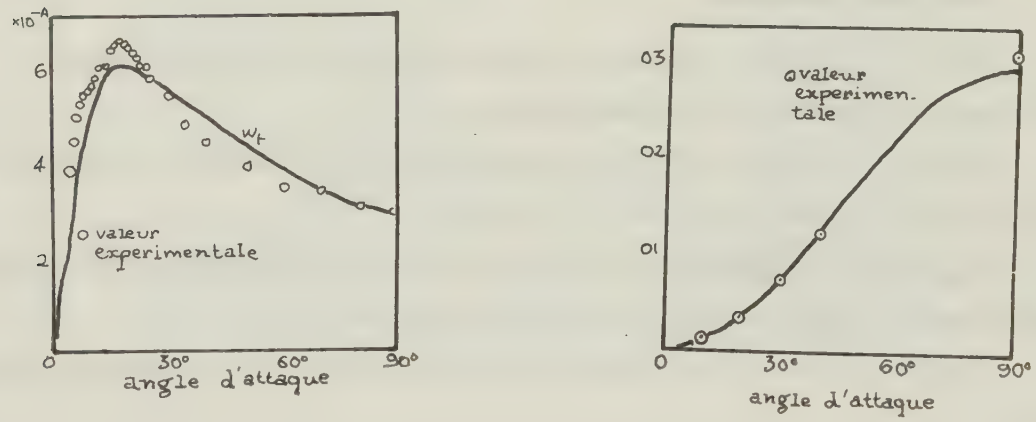


Fig.(59) - Evolution de la perte de volume par érosion en fonction de l'angle d'attaque

Dans le cas des matériaux ductiles V passe par un maximum quand α est faible tandis que dans le cas des matériaux fragiles V augmente quand α croît de 0 à 90°. Ces formules traduisent correctement les résultats expérimentaux Fig.(60).



a) échantillon d'aluminium b) échantillon de verre

Fig.(60) - Evolution de la perte de masse par érosion en fonction de l'angle d'attaque α . Facteurs de l'usure - vitesse des particules 107 m/s, les particules érosives en alumine ont un diamètre moyen de 210 μm.

III-3-3 - Influence de la taille des particules érosives

La courbe montrant l'évolution de la perte de masse en fonction du diamètre des particules présente deux parties principales, Fig.(61).

a) quand la taille des particules croît de 5 à 100 μ_m. La perte de masse croît rapidement suivant une loi linéaire.

b) pour des particules dont la taille est supérieure à 100 μ_m la perte de masse est indépendante de la grandeur des particules érosives.

Cette loi est intéressante car dans la pratique il est plus difficile de filtrer les petites particules que les grandes.

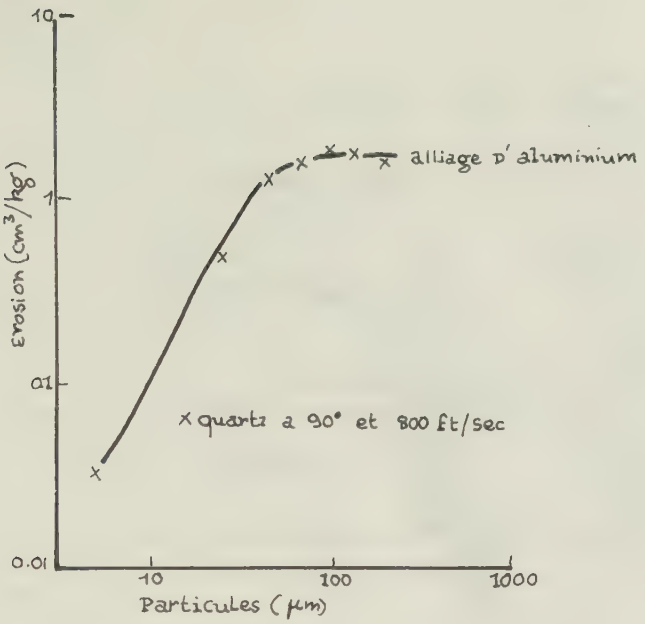


Fig. (61) d'après [120] - Evolution de la perte de masse par érosion en fonction de la taille des particules érosives de quartz.

Pour expliquer cette observation on a formulé les hypothèses suivantes :

- La fragmentation des grandes particules pendant le choc accroît leur efficacité à la coupe [121] et [122].
- La résistance mécanique des couches superficielles s'accroît quand la charge diminue, par un phénomène analogue à celui de la nanodureté [123]
- Les particules de faible diamètre sont peu efficaces car elles sont portées par les filets fluides, déviés au voisinage de la pièce érodée [124]

III-3-4 - Influence de la vitesse

La perte de masse par érosion augmente lorsque la vitesse des particules croît, Fig. (62). Ceci s'explique par l'accroissement de l'énergie cinétique et par une fragmentation des particules qui fait qu'à l'érosion principale s'ajoute une érosion secondaire [122].

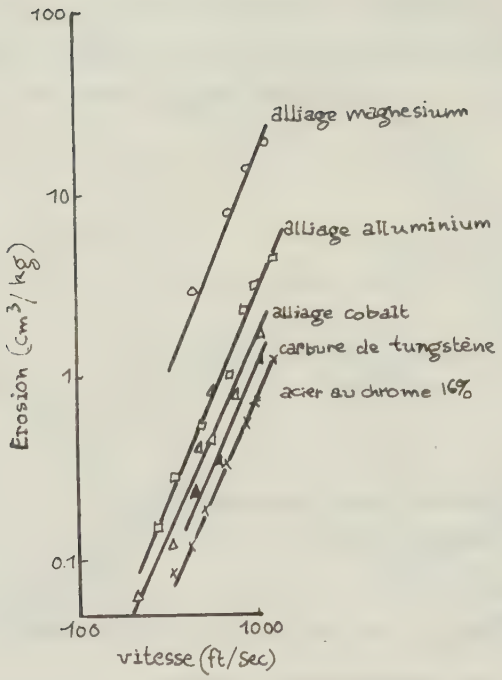


Fig. (62) d'après [121] - Evolution de la perte de masse par érosion en fonction de la vitesse des particules érosives.
Facteurs de l'usure : particules érosives en quartz de 150 μm de diamètre, angle d'attaque 90°.

III-3-5 - Influence de la nature des matériaux

La perte de masse par érosion diminue quand la dureté des matériaux augmente, Fig. (63).

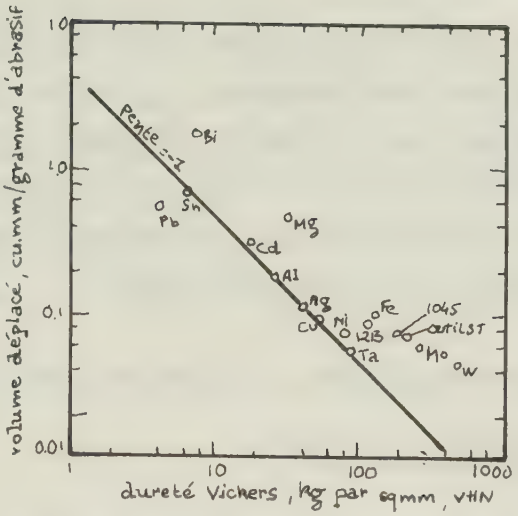


Fig. (63) d'après [123] - Evolution du volume enlevé par érosion en fonction de la dureté Vickers des métaux.
Facteurs de l'usure : les particules érosives sont en carbure de silicium de granulométrie 60 mesh, l'angle d'attaque est de 20°

III-3-6 - Conclusions

Pour lutter contre l'usure érosive il faut accroître la dureté des matériaux et filtrer les fluides porteurs pour éliminer les particules de grande taille.

III-4 - Détérioration des surfaces par des surcharges, Usure par fatigue

Des charges trop fortes peuvent détériorer les surfaces. On peut observer des déformations plastiques sur les métaux ductiles et des cassures sur les matériaux fragiles. Dans le cas du roulement l'effet des contraintes peut se faire sentir après plusieurs millions de passages. Certains auteurs [125] à [128] ont considéré l'usure pendant le glissement comme la conséquence d'un phénomène de fatigue des couches superficielles.

III-4-1 - Détériorations des surfaces par des surcharges

A) Matériaux ductiles

Considérons le contact d'une sphère et d'un plan Fig.(64) a est le rayon de contact hertzien. P la charge et Re la limite élastique en traction simple du matériau constituant l'échantillon plan. En appliquant le critère de Tresca on sait [131] que les premières déformations plastiques apparaissent au point de cisaillement maximum Fig.(65) pour $Pm = 1{,}1\ Re$ avec $p_m = \frac{P}{\pi a^2}$

Si la charge augmente la région déformée plastiquement croît rapidement et pour $p_m = 3\ Re$ toute la région de contact flue [126] Fig.(64b)

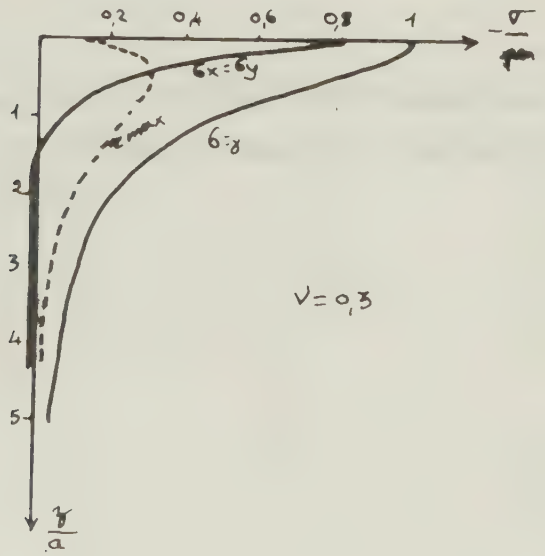


Fig. 65

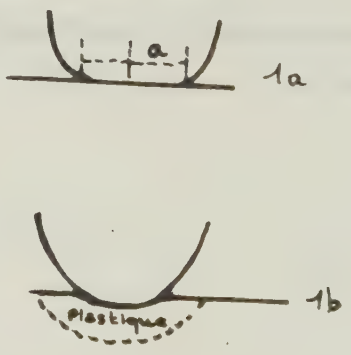


Fig. 64

Fig.(64) a - schéma du contact hertzien
(64) b - déformation plastique de l'échantillon

Fig.(65) - distribution des contraintes principales selon l'axe des z point de cisaillement maximum, d'après [130]

Ainsi, en statique s'il se produit une surcharge on peut avoir des déformations plastiques des éléments en contact.

Si on considère le cas d'une sphère dure qui glisse sur un matériau ductile on peut avoir en fonction du rapport de l'enfoncement h dans le plan au rayon R du frotteur sphérique on peut observer trois cas [131] - Fig. (66)

1) déformation élastique
2) repoussage plastique avec formation d'un bourrelet frontal
3) déchirement du matériau repoussé devant l'indenteur avec formation d'un copeau.

Fig. (66) détérioration de la surface en fonction du rapport $\frac{h}{R}$ d'après [126]

I - Déformation élastique - métaux ferreux $\frac{h}{R} < 0,01$, non ferreux $\frac{h}{R} < 0,0001$

II - Déformation plastique - frottement sec $\frac{h}{R} < 0,1$, frottement lubrifié $\frac{h}{R} < 0,3$

III - Usinage par enlèvement de copeaux, frottement sec $\frac{h}{R} > 0,1$, frottement lubrifié $\frac{h}{R} > 0,3$.

Le deuxième cas a été étudié systématiquement [132]. Et on observe après frottement dans la trace trois effets caractéristiques planche 2 .

a) Un élargissement de la trace indiquant que le frotteur s'est enfoncé en se déplaçant dans la direction de la sollicitation tangentielle, il s'agit là d'un effet de la plasticité des couches superficielles.

b) Des émergences de bandes de glissement cristallographique en avant et sur les côtés de la trace.

c) En avant de la trace une surélévation de l'ordre du micron de la surface, celle-ci apparaît ainsi comme repoussée par le frotteur, agissant globalement comme une grosse aspérité hémisphérique qui refoule devant elle la matière. Cette surélévation est appelée bourrelet frontal.

Ainsi les processus du glissement modifient eux-mêmes les propriétés mécaniques et la topographie superficielle de la piste en avant de la zone en contact avec le frotteur. Ce dernier ne rencontre donc jamais une surface vierge dont les propriétés soient parfaitement définies.

B) Matériaux fragiles -

Considérons le contact statique d'un frotteur sphérique et d'un échantillon plan. La piste est constituée d'un matériau fragile, le frotteur est plus dur que la piste. Si à partir d'une valeur faible on augmente progressivement la charge on voit apparaître pour une valeur critique P^* une fissure de forme circulaire sur la surface de la piste. Lafracture Fig.(67) a l'aspect d'untronc de cône intersectant la surface de l'échantillon légèrement en dehors de cercle de Hertz (rayon de la fissure superficielle = 1,12 a). L'angle au sommet a environ 68°. Cet angle de 68° est précisément l'angle asymptotique des isostatiques σ_3 avec l'axe de symétrie. De façon approximative la fracture s'effectue perpendiculairement à la plus grande contrainte de traction σ_1 , en suivant une surface définie par les isostatiques des deux autres contraintes principales σ_2 et σ_3. Partant d'un point de la surface où σ_1 , est maximum la fracture suit l'isostatique circulaire de σ_2 et s'enfonce d'abord verticalement puis suivant un cône.

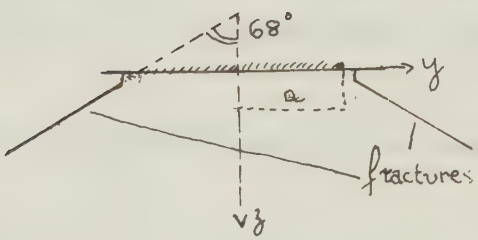


Fig.(67)- Schéma de la fracture hertzienne dans le plan z, y.

D'après Lawn[133] la charge critique P^*, le rayon R de l'indenteur sphérique, l'énergie superficielle γ du matériau fragile sont liés par la formule suivante :

$$\frac{P^*}{R} \simeq 4.10^5 \; k_1 \gamma$$

avec : $k_1 = \frac{9}{16}\left[(1-\nu^2) + (1-\nu'^2)\frac{E}{E'}\right]$

ν.E ; ν'E' sont les coefficients de Poisson et les modules d'élasticité des matériaux de la piste et de l'indenteur.

Si le frotteur glisse sur la piste la distribution des contraintes dépend du coefficient de frottement. La figure (68) montre le tracé des isostatiques pour f = 0,1 et f = 0,5. Lorsque le coefficient de frottement augmente l'isostatique σ_2 perd sa symétrie par rapport à l'axe des z et l'isostatique σ_3 s'enfonce plus verticalement. La figure (69) montre l'allure des fissures superficielles pour des valeurs faibles et élevées du coefficient de frottement.

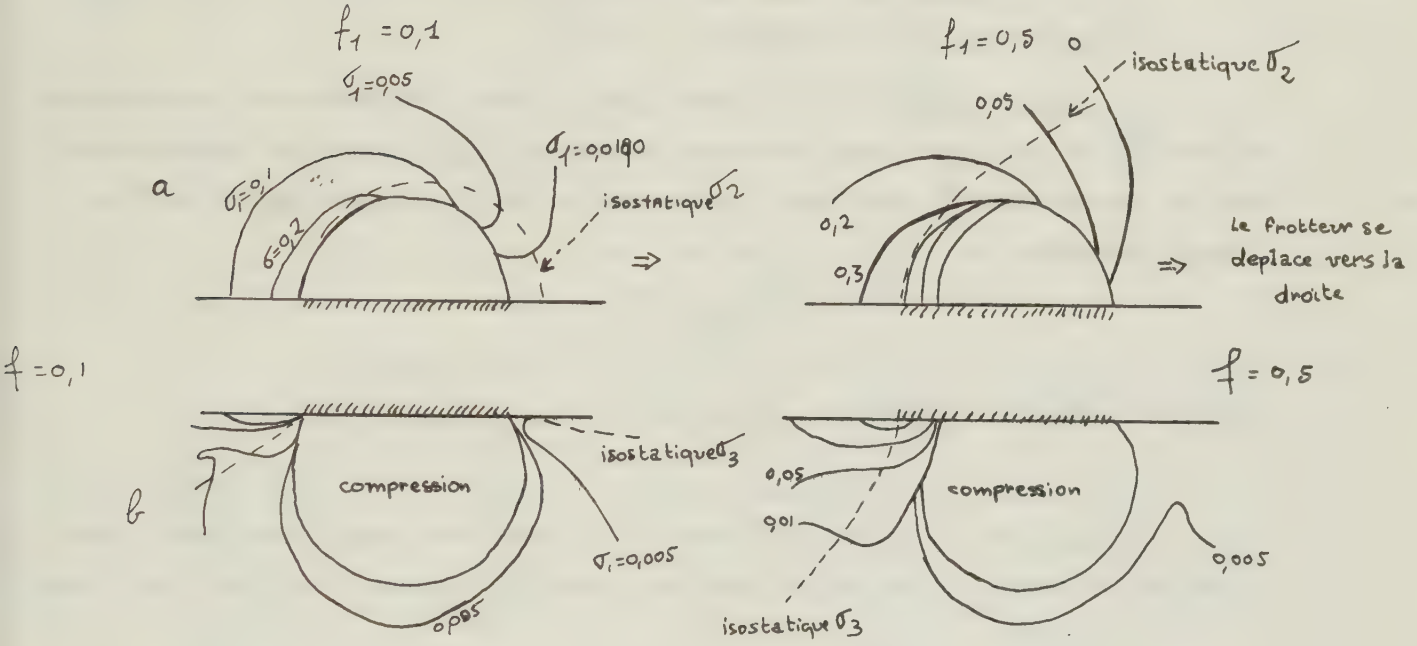


Fig. (68) d'après [133]- allure des isostatiques dans le cas ou f = 0,1 et f = 0,5

a) vue de dessus

b) vue latérale.

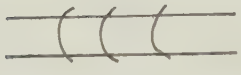


Fig.(69) - forme des fissures superficielles en fonction de la valeur du coefficient de frottement.

Les forces tangentielles modifient la forme des fractures hertziennes et facilitent leur naissance. D'après Gilroy et Hirst la charge critique pendant le glissement P^*f est liée à la charge critique ou statique P^* par la formule suivante.

$$P^*f = \frac{P^*}{(1 + \beta f)^3}$$

avec : $\beta = \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{4 + \gamma}{1 - 2\gamma}$

La planche (3) montre les résultats obtenus lorsqu'une bille d'acier est en contact avec une plaque en verre. Les résultats sont identiques lorsqu'une bille dure est en contact avec un échantillon plan de carbure de titane.

III-4-2 - Usure par fatigue dans le cas du roulement

Les phénomènes de fatigue dans le cas du roulement se manifeste par des fissures, des écailles, des changements de structure métallurgique et des déplacements des couches superficielles [136]

A) Fissures et écailles

Quand les roulements à billes en acier de nuance 100 C 6 sont très chargés, on observe très souvent sur les bagues de roulement après 10^6 cycles environ, des fissures profondes qui se propagent à 0,2 ; 0,3 mm sous la surface de roulement et rejoignent la surface soit obliquement, soit perpendiculairement Fig.(70)

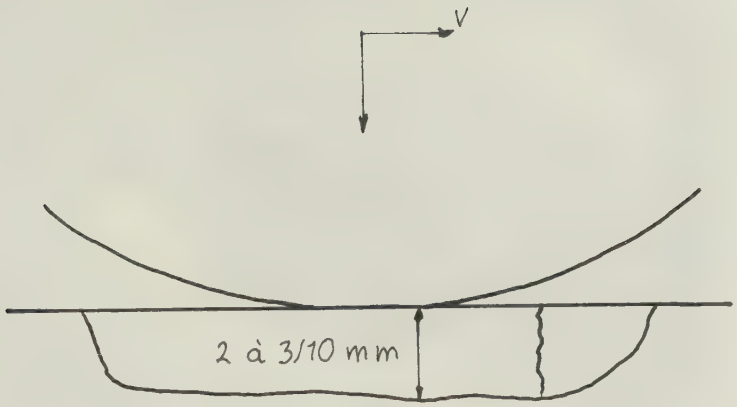


Fig.(70) d'après[136] - mode de propagation des fissures de fatigue sous la surface dans le cas du roulement.

En se propageant les fissures donnent naissance à des particules d'usure appelées écailles, Fig.(71) Les écailles ont des dimensions voisines de celle de l'aire de contact. Ce mode de détérioration est observé également dans les engrenages au niveau du cercle primitif [137],[138].

On admet que les fissures prennent naissance dans les régions où la contrainte hertzienne de cisaillement est la plus forte.

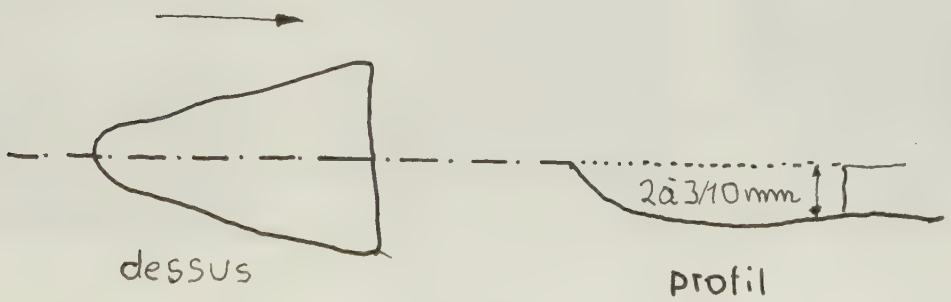


Fig.(71)- Forme d'une écaille d'après [136].

B) Changements de structure métallurgique

Sous forte charge il se produit des modifications structurales dans la zone située en dessous du chemin de roulement[133] à [143]. Dans le cas de l'acier 100 C 6 on observe l'existence de zones noires et de phases blanches. La position des zones de transformation structurale est indiquée sur la Fig.(72)

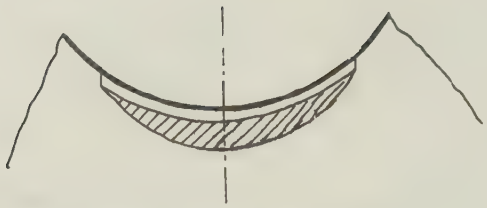


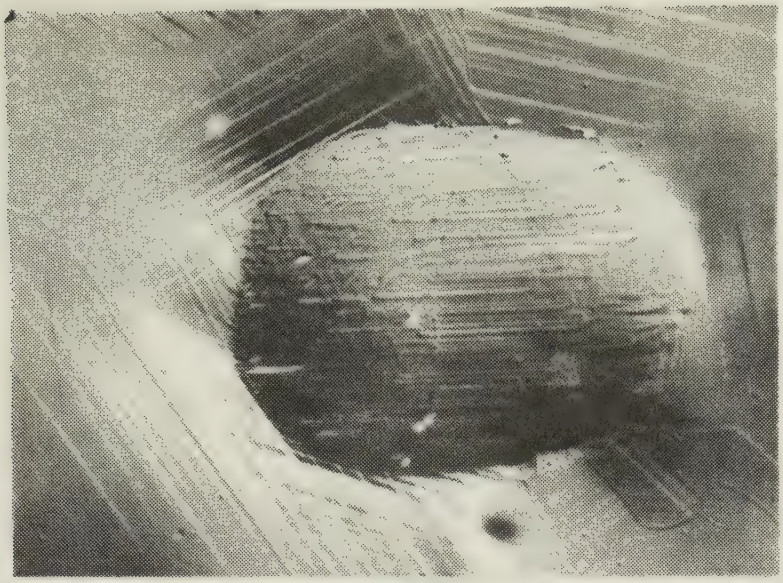
Fig.(72) d'après [142] - Emplacement hachuré des zones de transformation structurale dans le cas du roulement.

Les zones noires sont très sensibles à l'attaque nital et ont la forme d'aiguilles et de lignes. Leur structure est du type sorbitique. On observe aussi l'existence de phases blanches orientées à 23° par rapport à la tangente à la gorge intérieure. Elles ont l'aspect d'une ferrite écrouie autour de laquelle vient précipiter le carbone expulsé de ces zones. Sous l'effet d'un gradient de pression, dû à la déformation localisée le carbone migrerait jusqu'à la frontière de la bande blanche où se produirait alors une précipitation [143]. On retrouve également cette modification structurale propre à la fatigue au voisinage de certaines inclusions non métalliques. Dans ce cas on assiste à la formation de papillons [141], ainsi nommé à cause des ailes qui se développent de part et d'autre de l'inclusion. Les papillons ont une orientation en liaison avec le sens de rotation du roulement. Si le roulement est amené à tourner dans les deux sens, il est possible de former des papillons doubles. La formation d'un papillon précède la fissuration et à partir d'un certain stade fissure et papillon progressent simultanément jusqu'au moment où la fissure progresse plus rapidement pour rejoindre la surface de la piste.

Le calcul des dimensions de la zone de contact par le modèle de Hertz ne permet pas de retrouver les dimensions des zones très déformées observées expérimentalement : celles-ci étant approximativement trois fois plus profondes que les zones théoriques. Cette différence est probablement due au rôle joué par les déformations plastiques apparaissant au cours de l'essai [141].

C) Déplacement des couches superficielles

Dans le cas du roulement sous forte charge de deux cylindres métalliques l'un contre l'autre, les couches superficielles des cylindres ont tendance à se déplacer en avant par rapport à la rotation des cylindres [144] et [145]. Si avant



x 600

Planche 3

Trace d'un déplacement préliminaire effectué sur une surface polycristalline de laiton ✂ polie électrolytiquement

Facteurs de l'usure : bille acier Ø 1 mm

charge 1 f.N

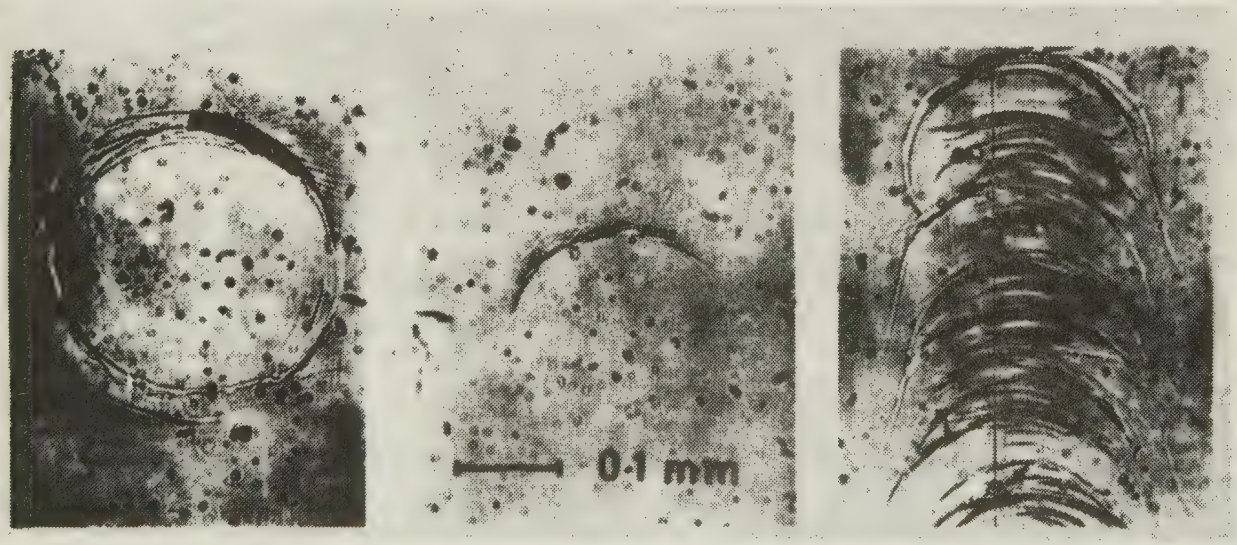


Planche 4

Fissuration d'un échantillon fragile par une sphère dure, d'après [135]

Facteurs de l'usure : Ø sphère 6,2 mm, sphère en acier dur, échantillon en verre.

a) charge statique p^{*} = 7 da N

b) charge normale 2 da N, force tangentielle 0,5 da N ∠ force de frottement.

c) charge normale 2 da N, glissement force de frottement = 1 da N

l'expérience on trace un rayon O M sur la base du cylindre, ce rayon se courbe lors du roulement dans le sens indiqué sur la Fig.(73). Ce déplacement croît avec la charge, la vitesse et le nombre de cycles[144]

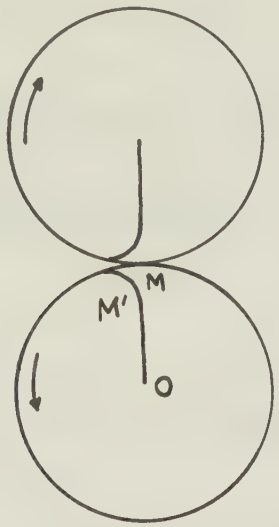


Fig.(73) d'après[136] - Déplacement des couches superficielles dans le cas du roulement sans glissement.

Ce déplacement qui est fonction de la zone déformée plastiquement a été observé sur l'acier, le cuivre, l'aluminium, que le contact soit lubrifié ou non.

D) Durée de service des roulements à billes et à rouleaux

La durée de service des roulements à billes et à rouleaux est régie par la loi de Palmgren[147] qui s'exprime par les égalités suivantes :

$$Pi^3 \; Ni = P1^3 \; N1 = P2^3 \; N2 = cte$$

ou Pi est la charge supportée par le roulement et Ni la durée de vie du roulement c'est-à-dire le nombre de rotations effectuées par le roulement avant qu'apparaisse le premier écaillage. Les contraintes hertziennes étant ptoportionnelles à $P\frac{1}{3}$ en appelant τ la contrainte de cisaillement, il vient :

$$\tau_i^9 \; N_i = cte$$

III-4-3 - Usure par fatigue dans le cas du glissement

Kragelski et Bayer ont proposé de considérer l'usure pendant le glissement comme un phénomène de fatigue. Ils ont proposé en adoptant une loi de comportement à la fatigue des couches superficielles des critères dont l'application garantit une durée de vie des mécanismes. Nous rappelons brièvement les principes de ces calculs.

A) Principe de la méthode Kragelski de calcul de l'usure [146] à [149].

V est le volume usé quand on se déplace de la longueur L

V_1 est le volume usé quand on se déplace d'une longueur d égale au diamètre moyen d'une jonction.

On suppose que $\frac{V_1}{d} = \frac{V}{L}$

Soit V' le volume repoussé quand la surface antagoniste s'appuie sur la surface usée. La figure (74) montre V' dans le cas d'une aspérité unique déformable quand elle est en contact avec une surface antagoniste infiniment rigide.

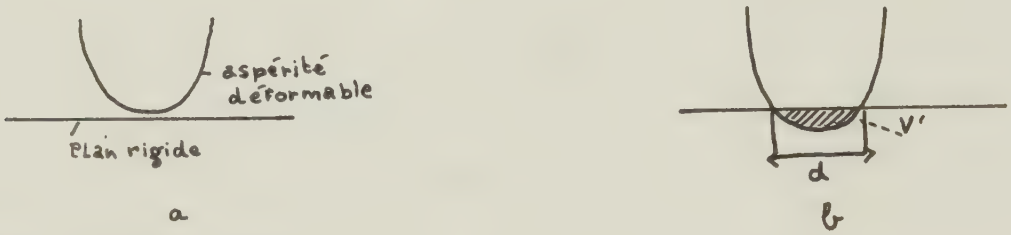


Fig.(74) a) avant contact
b) après écrasement de l'aspérité.

Dans le cas d'une surface rugueuse ce volume est calculable lorsqu'on se donne un modèle géométrique des aspérités superficielles et une loi de distribution en hauteur de ces aspérités.

On pose $V_1 = \frac{V'}{q}$

Le volume V_1 est donc une fraction du volume repoussé, et il faut que V' ait été repoussé q fois avant d'être entièrement enlevé par usure.

q est un nombre qui tient compte de la résistance des couches superficielles à la fatigue dans l'état de contrainte considéré.

Si le contact est élastique q est déterminé à partir des courbes de Wöhler représenté par une loi du type $(\frac{Re}{\sigma})^n = q$ où $3 < n < 14$

σ étant la contrainte de traction qui provoque la rupture après q sollicitations dans les calculs on pose $\sigma = f\ pr$, pr étant la pression réelle qui s'exprime en fonction de la pression hertzienne moyenne.

Si le contact est plastique q est déterminé à partir de la loi de Coffin $(2\ \frac{\varepsilon_o}{\varepsilon})^n = q$

ε_o est l'allongement relatif en traction d'un échantillon qui se rompt après une seule sollicitation. ε est l'allongement relatif après q sollicitations en traction.

Dans le cas de l'abrasion $q = 1$

Ar et Aa étant les aires réelles et apparentes de contact, le taux d'usure linéaire $U\ell$ est donné par l'équation suivante :

$$U\ell = Us \times \frac{Pa}{Pr}$$

formule dans laquelle Us, usure spécifique $= \frac{V_1}{Ard}$

Pa, Pr, les pressions apparentes et réelles.

$$P = Aa\ Pa = Ar\ Pr$$

On peut ainsi en se donnant un modèle géométrique de la surface, de la nature du contact et d'hypothèses au sujet de la résistance des couches superficielles à la fatigue, calculer $U\ell$.

q est analogue à l'inverse du coefficient d'Archard k, c'est-à-dire a la possibilité qu'a une jonction de donner un débris d'usure. Le principal défaut de ces calculs est que les hypothèses de départ sont incertaines, en effet la géométrie et la résistance des couches superficielles à la fatigue sont mal connus.

B) Critère de Bayer et autres [150] à [152]

Pour que l'épaisseur enlevée par usure reste inférieure ou égale à la rugosité totale de la pièce il faut que la contrainte moyenne $\mathcal{C}$ max de cisaillement en surface reste inférieure ou égale à une fraction donnée de la résistance $\mathcal{C}$ y du matériau au cisaillement.

$$\mathcal{C}_{max} \leq C\mathcal{C}_y$$

C dépend du régime d'usure et de la loi de comportement des couches superficielles à la fatigue. La loi adoptée par les auteurs est celle de Palmgren qui régit la durée de vie des roulements à billes, tout calcul fait [148] il vient :

$$C = \left(\frac{2000}{N_1}\right)^{\frac{1}{q}} C_R$$

$C_R = 0{,}54$ si les surfaces sont lubrifiées.

$C_R = 0{,}20$ quand l'usure est sévère.

dans le cas du frotteur $Ni = \frac{L_1}{d} \times N = \frac{L}{D}$ Fig.(75)

N est le nombre de passages et L la distance totale parcourue

$$C = \left(2000 \frac{d}{L}\right)^{\frac{1}{9}} C_R \quad \text{ou} \quad \frac{L}{d} = cte \times \left(\frac{\mathcal{C}_y}{\mathcal{C}_{max}}\right)^9$$

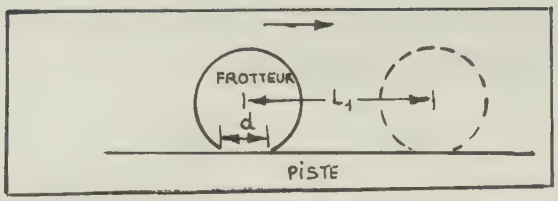


Fig.(75) Définition de $N_1 = \frac{L_1}{d} \times N$

L_1 est la distance parcourue par le frotteur au cours de chaque passage.

Quand on applique ce critère on observe que les charges autorisées sont faibles en regard de la dimension des pièces en contact. L'utilisation de ce critère n'est intéressante que dans les applications où on demande aux pièces en contact de transmettre des efforts de faible amplitude. Par exemple dans le cadre des industries électriques et électroniques.

C) Remarques

Le critère de Bayer peut se déduire de la formule de Kragelski dans le cas du contact élastique si on étudie l'usure du frotteur.

En effet si $\mathcal{C}_{max} = C\,\mathcal{C}_y$

$$\frac{L}{d} = cte \times \left(\frac{\mathcal{C}_y}{\mathcal{C}_{max}}\right)^9$$

D'autre part dans les hypothèses de Kragelski on a :

$$\frac{V}{L} = \frac{V_1}{d} = \frac{V'}{q\,d}$$

Si on admet qu'après avoir glissé sur la distance L le volume V' défini plus haut a été entièrement usé, c'est-à-dire que V' = V, ou encore L = q d

$$\frac{L}{d} = q = \left(\frac{Re}{\sigma}\right)^n = cte \left(\frac{\mathcal{C}_y}{\mathcal{C}_{max}}\right)^9$$

Re et $\mathcal{C}_y$ sont dans le cas des métaux des fractions connues de la dureté Brinell H

σ et $\mathcal{C}_{max}$ sont proportionnelles à la pression hertzienne moyenne.

Dans le cas du contact élastique $3 < n < 14$ d'après Kragelski [154]. On retrouve donc le critère de Bayer en choisissant $n = 9$ et en donnant une valeur appropriée à la constante.

III-5 - Détérioration des surfaces par corrosion, Usure corrosive

Elle se définit comme "un processus d'usure dominé par une réaction chimique ou électrochimique avec le milieu environnant" [155].

Cette forme d'usure qui a été peu étudiée est en général modérée. Elle peut cependant devenir très prononcée surtout aux températures élevées ou dans des atmosphères humides.

Dans certains cas, il y a d'abord une réaction chimique suivie d'un enlèvement des produits de corrosion par une action mécanique. Le processus comprend donc deux stades distincts [156]

1°) Il se produit une corrosion des surfaces métalliques selon les processus classiques de corrosion. La figure (76) montre deux courbes types de l'évolution de la quantité de matière corrodée en fonction du temps.

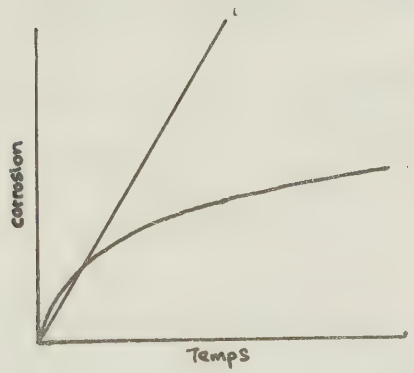


Fig. (76) d'après [156] - Evolution de la quantité de matière produite par corrosion.
a) Quand il se forme un film protecteur
b) Quand le film de matériau produit par la corrosion ne protège pas la surface.

2°) Le film de matériau corrodé est enlevé lors du mouvement relatif des pièces en contact, le matériau sous-jacent est mis à nu et le processus recommence.

Selon la nature du film superficiel on peut schématiquement prévoir deux types de destruction:

Si le film superficiel est fragile, c'est le cas de nombreux oxydes, il est enlevé par plaques dès que son épaisseur dépasse une certaine valeur critique Fig.(77a). Le taux d'usure est important Fig.(78a).

Si le film superficiel est ductile c'est le cas de certains sulfures, le cisaillement se produira dans l'épaisseur du film Fig.(77b) et le taux d'usure sera faible Fig.(78b).

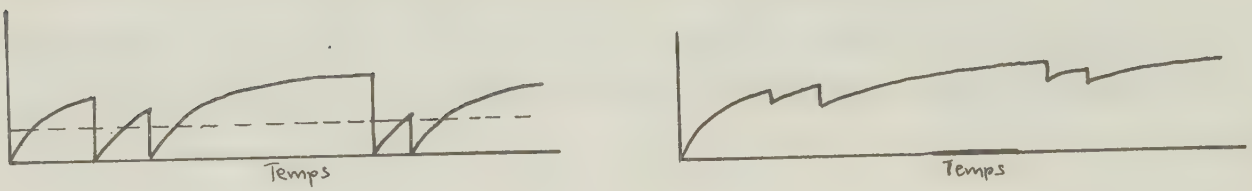


Fig.(77) Evolution de l'épaisseur du film de matériau corrodé en fonction du temps.

a) Film fragile

b) Film ductile

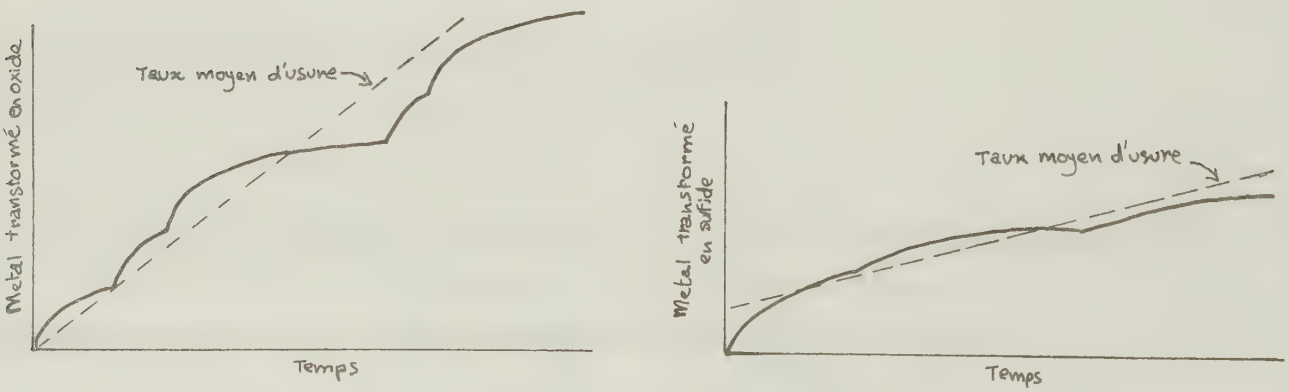


Fig.(78) d'après[156] - Evolution du taux d'usure en fonction du temps

a) Film fragile

b) Film ductile

IV - CONCLUSIONS : CHOIX DES CONDITIONS EXPERIMENTALES DE NOTRE ETUDE

L'usure considérée dans son sens le plus large, c'est-à-dire comme la détérioration que produit l'usage, peut être due à plusieurs processus physiques chimiques et mécaniques indépendants. Les chercheurs proposent des schémas différents parce qu'ils veulent mettre l'accent chacun sur un point de vue particulier. En fait, l'usure considérée comme un phénomène global est très difficile à décrire sous forme quantitative. Les différentes approches théoriques qui sont faites, le sont à partir d'hypothèses très simplificatrices. L'une des principales difficultés dans l'étude de l'usure des matériaux couramment utilisés est que les couches superficielles sont mal connues. Le processus de glissement lui-même peut changer la nature des surfaces, soit par écrouissage, soit en modifiant leur rugosité, soit en produisant de nouvelles phases ou alliages, ou encore de nouvelles structures à l'interface. La plupart des processus d'usure s'accompagnent lors de la phase initiale de l'usure de déformations plastiques, c'est le cas de l'adhésion, de l'abrasion, de l'érosion. Il est donc intéressant du point de vue scientifique d'étudier l'endommagement et la transformation d'une surface métallique sous l'effet des glissements successifs contre une surface antagoniste lorsqu'il se produit, dès la phase initiale de l'usure, une déformation plastique. Pour mettre en relief l'effet de la déformation plastique initiale nous choisissons des conditions expérimentales qui diminuent l'effet de l'adhésion.

IV-1 - Les facteurs de l'usure

IV-1-1 - Mode de contact -

Dans ce travail nous avons choisi le mode de contact sphère sur plan pour les raisons suivantes :

a) La forme sphérique permet d'éviter les angles vifs qui peuvent être à l'origine des surcontraintes hertziennes. Les imperfections géométriques des échantillons et des dispositifs de mesure rendent difficile l'obtention sur un tribomètre de contacts linéaires ou surfaciques parfaits.

b) La plupart des auteurs [157] à [159] considèrent que l'on peut lors du calcul des aires de contact entre solides schématiser les aspérités microgéométriques des pièces réelles par des sphères de même rayon ayant une distribution donnée en hauteur. Il est donc intéressant de savoir comment se détériore une surface plane lorsqu'elle est soumise au frottement d'un frotteur sphérique. Nous avons utilisé des sphères dont les diamètres sont de 26, 20, 10, 5 mm.

IV-1-2 - Etat de surface microgéométrique -

Dans la présente étude l'état de surface microgéométrique du frotteur sphérique a été choisi aussi lisse que possible afin d'éviter un effet d'abrasion de la surface antagoniste par les aspérités superficielles. Pour y parvenir on a poli mécaniquement le frotteur hémisphérique lorsqu'il est usiné à partir d'une barre métallique, ou bien on a choisi des billes d'acier à roulement. Ces dernières possèdent un bon état de surface par suite des procédés de finition qu'elles ont subis lors du dernier stade de leur fabrication.

L'état de surface microgéométrique de l'échantillon plan dépendra des procédés mécaniques ou chimiques mis en oeuvre pour préparer sa surface. Les états de surface des échantillons plans, selon les expériences, ont été obtenus par les procédés suivants : tournage, polissage mécanique, polissage électrolytique, laminage.

Les états de surface ont été étudiés par les méthodes suivantes : profilométrie électro-mécanique, microscopie optique, coupe optique de Schmaltz [160], répliques selon la technique Jacquet [161], répliques au microscope électronique.

IV-1-3 - Charge -

La valeur de la charge a été choisie de façon à obtenir une déformation plastique de l'aluminium dès le premier passage. Elle est appliquée avant le début du glissement et reste constante pendant toute la durée de l'expérience.

Au cours des différentes expériences nous avons utilisé les charges suivantes : 5 N, 1 da N, 1,87 da N, 2 da N, 2,16 da N, 4 da N, 4,16 da N, 5 da N.

IV-1-4 - Vitesse -

Nous avons utilisé le glissement unidirectionnel et bidirectionnel. Le glissement unidirectionnel à 4,07 mm/s est obtenu par la mise en rotation uniforme d'un disque d'aluminium tournant autour de son axe vertical. Les résultats obtenus à l'aide de ce dispositif, ont été complétés, par l'utilisation d'un tribomètre, animant une plaquette d'aluminium, d'un mouvement alternatif à la vitesse moyenne de 0,016 mm/s.

IV-1-5 - Ambiance -

Le contact des solides se fait en présence d'un lubrifiant, en régime limite, pour éviter que l'adhésion ne conduise à une destruction trop rapide des couches superficielles des pièces frottantes.

Dans la première partie du travail expérimental nous avons utilisé comme lubrifiant de l'huile de vaseline. Ce liquide a été utilisé parce qu'il mouille bien l'aluminium oxydé et qu'il peut dissoudre certains acides gras.

Les premiers résultats obtenus ont été complétés par l'étude de la phase initiale de l'usure du couple acier-aluminium dans les ambiances suivantes : huile de vaseline additionnée de différents pourcentages d'acide oléique, eau bidistillée, eau bidistillée additionnée d'un agent tensio-actif, cétane, esters de synthèse, frottement à sec.

IV-1-6 - Nature des matériaux -

Dans cette étude le frotteur sphérique est en acier et l'échantillon plan en aluminium. Ces matériaux ont été choisis en raison de leur intérêt scientifique et industriel.

Pour étudier la phase initiale de l'usure lorsque l'une des pièces en contact est le siège de déformations plastiques il m'a paru intéressant de choisir l'aluminium. On sait [162] que ce métal est revêtu à l'état naturel d'une couche d'oxyde qui protège, dans certaines conditions d'ambiance, le métal sous-jacent de l'adhésion. Ce métal s'écrouit facilement, il se prête donc bien à l'étude de l'influence des déformations plastiques initiales lors de la phase initiale de l'usure. Pour mieux mettre en relief le rôle des transformations apportées par le frottement de glissement les échantillons d'aluminium sont recuits avant chaque expérience. Le traitement de recuit est effectué de façon à éliminer toutes les contraintes internes provenant de la préparation mécanique des échantillons.

L'aluminium entre dans la composition d'un grand nombre d'alliages légers utilisés en fabrication mécanique. Il est donc nécessaire de connaître son comportement au frottement et à l'usure. Grâce à leur propriétés de légèreté, de bonne résistance mécanique, de bonne conductibilité électrique et de résistance à la corrosion, ces alliages d'aluminium ont pris une importance de plus en plus grande dans les transports, les industries électriques, l'emballage, le bâtiment et les industries les plus diverses.

Les échantillons d'aluminium étudiés au cours des différentes expériences ont une pureté correspondant aux nuances suivantes : A 5, A 85, A 95, A 99.

La dureté des aciers utilisés dans les différentes expériences est au moins dix fois supérieure à celle de l'aluminium. La déformation plastique des échantillons d'aluminium se fait donc facilement lorsque la charge est suffisante.

L'acier est un contre-matériau de frottement fréquemment rencontré dans le cas de l'aluminium et des alliages légers. Il existe des problèmes d'usure entre l'acier d'une part et l'aluminium et les alliages légers d'autre part sur les véhicules de transport, et les outillages servant à la mise en forme de l'aluminium et des alliages légers.

Les échantillons d'aciers utilisés au cours de nos études avaient des compositions correspondant aux nuances suivantes : XC 38, XC 38 durci par carbonitruration, acier à 1 % de carbone, 100 C 6, 90 MV 8, Z 80 WDV 06.05.02.
Au cours d'une expérience il est possible de faire varier indépendemment : la charge, la vitesse et l'ambiance. Les trois premiers facteurs : mode de contact géométrique, état de surface microgéométrique, nature des matériaux sont des fonctions du temps et leur évolution dépend des mécanismes qui agissent lors de la phase initiale de l'usure.

IV-1-7 - Dans le tableau 2bis on a fait figurer les conditions initiales utilisées lors des différents travaux effectués pour étudier la phase initiale de l'usure lorsque l'une des pièces en contact subit des déformations plastiques dès le début du glissement.

Mode de contact géométrique : Sphère sur plan.
Diamètres des différents frotteurs sphériques 26, 20 10,5 mm.

Etat de surface microgéométrique : On a utilisé des frotteurs hémisphériques polis à la pâte diamantée, et des billes d'acier à roulement rodées.
Les échantillons plans ont été préparés selon le cas par les procédés suivants : tournage, polissage mécanique, polissage électrolytique, laminage.

Matériaux : Les frotteurs sont en acier de nuance XC 38, XC 38 carbonitruré, acier à 1% de carbone, 100 C 6, 90 MV 8 Z 80 WDV 06.05.02.
Les échantillons plans sont en aluminium dont la composition correspond aux nuances suivantes : A 5, A 85, A 95, A 99.

Ambiance : Huile de vaseline, huile de vaseline + différents pourcentages d'acide oléique, eau bidistillée, eau bidistillée + agent tensioactif, cétène, cétane, lubrifiant industriel, frottement à sec, esters.

tableau 2bis

Charge : 5 N, 1 da N, 1,87 da N, 2 da N, 2,16 da N, 4 da N, 4,16 da N, 5 da N.

Vitesse : 4,07 mm/s dans le cas du glissement unidimensionnel.
0,014 mm/s dans le cas du glissement bidirectionnel.

Résumé des conditions initiales utilisées lors des différentes études expérimentales : Tableau 2bis

Les conditions initiales seront précisées lors de la présentation des différentes études, en particulier on rappellera les procédés d'élaboration des couches superficielles.

IV-2 - Les effets observés

Afin de connaître l'action des différents processus lors de la phase initiale de l'usure nous avons étudié à l'aide des méthodes scientifiques récentes les phénomènes observés. Les méthodes expérimentales sont présentées de façon détaillée dans la deuxième partie du présent travail.

IV-2-1 - Résistance au déplacement -

Dans ce travail nous étudions le frottement de glissement en mesurant la force de frottement $\vec{T}$, afin de relier sa variation en fonction du temps à la détérioration des surfaces glissantes.

IV-2-2 - Vibrations -

Nous mesurons les vibrations du frotteur dans trois directions afin de déceler les modifications et endommagements des couches superficielles.

IV-2-3 - Phénomènes thermiques -

Ici nous limitons l'effet de la température éclair en plaçant un lubrifiant entre les surfaces en contact et en choisissant une vitesse de glissement faible. Pour diminuer la température de masse nous prenons des échantillons dont la capacité calorifique est considérable en regard de l'énergie totale dégagée par le frottement.

IV-2-4 - Transformations géométriques -

Nous avons mesuré par des méthodes complémentaires les états de surface microgéométriques des pièces frottantes.

IV-2-5 - Transformations mécaniques et physiques -

Ce point particulièrement important dans la suite des travaux a été étudié par la mesure de la microdureté, de l'étude de la recristallisation, et de l'écrouissage préalable des pistes d'aluminium.

IV-2-6 - Variation de masse -

Nous n'avons pas effectué de mesure de variation de masse des pistes et frotteurs. En effet, cette mesure ne constitue pas généralement une méthode suffisamment analytique pour étudier la phase initiale de l'usure.

DEUXIEME PARTIE

METHODES EXPERIMENTALES

Afin d'étudier la phase initiale de l'usure d'un échantillon d'aluminium, qui glisse contre un frotteur en acier, en subissant dès le premier passage des déformations plastiques, nous avons modifié deux tribomètres utilisés lors d'études antérieures (164).

Le premier est un tribomètre à mouvement rotatif. Dans la première partie de l'étude expérimentale, nous avons étudié et construit un dispositif n° 1 permettant de mesurer simultanément la force de frottement et les accélérations du porte-frotteur. Avec ce dispositif, on ne peut faire qu'une seule trace sur l'échantillon d'aluminium. Après l'obtention des premiers résultats, nous avons été amené à construire un dispositif n° 2 permettant d'effectuer successivement plusieurs traces sur l'échantillon d'aluminium et de mesurer chaque fois la force de frottement.

Le second est un tribomètre à mouvement alternatif (165). Il permet la mesure de la force de frottement et de la résistance de contact.

Nous allons décrire ci-dessous, plus en détail, les différents appareillages et méthodes expérimentales mis en oeuvre au cours de la présente étude.

I. TRIBOMETRE A MOUVEMENT ROTATIF

I - 1 Formes et dimensions des échantillons

L'échantillon d'aluminium est un disque, évidé dans sa partie centrale, dont les dimensions sont indiquées sur la figure 79-1. Le disque est centré par son diamètre extérieur et entrainé en rotation par un ergot latéral en acier. Il repose sur le tribomètre par sa face inférieure usinée par tournage fin.

Le frotteur en acier peut avoir la forme d'une sphère quand c'est une bille de roulement ou d'une hémisphère quand il est usiné à partir d'un barreau d'acier. Ses cotes principales sont indiquées sur la figure 79-2.

Sur la planche 5, on peut voir la photographie d'un frotteur en acier dont la calotte hémisphérique a un diamètre de 10 mm et d'un échantillon d'aluminium, dont la surface préparée par tournage présente une trace de frottement.

.../...

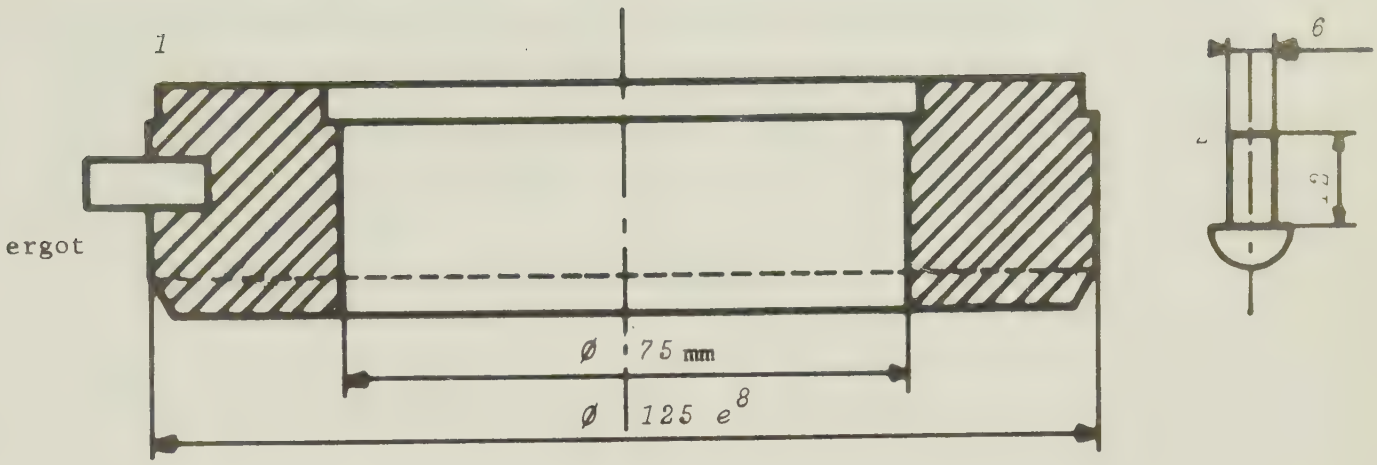


Fig. 79

Planche 5

I - 2 Entrainement de l'échantillon d'aluminium

L'échantillon d'aluminium est supporté, centré et entrainé d'un mouvement de rotation uniforme par un cylindre porte-échantillon. Ce cylindre est mobile par rapport au bâti grâce à un roulement et à une butée à billes dont les axes de rotation sont verticaux et confondus. Il porte à sa partie supérieure une poulie entrainée par une courroie trapézoïdale, dont le mouvement est commandé par un moteur à vitesse variable.

I - 3 Description du dispositif expérimental n° 1

Le dispositif,utilisé dans la première phase de notre travail, permet de mesurer la force de frottement, et les accélérations du porte-frotteur. Sur la figure 80, on peut voir les différentes parties constitutives.

1°) Une tête parallèpipédique (1) comportant un alésage cylindrique servant au centrage et au serrage du frotteur. Sur la partie supérieure, on a collé à l'araldite une plaquette sur laquelle on peut visser un capteur triaxial d'accélérations.

2°) Une tige cylindrique (2) relie la tête précédente à des lames élastiques. Ces dernières ont pour rôle, d'une part, de permettre la mesure de la force deffrottement, et d'autre part, de donner au frotteur la possibilité de se déplacer parallèlement aux directions $M''x$, $M''y$, $M''z$.

3°) Un contre-poids (5) réglant la position du frotteur de sorte que ce dernier soit sous charge nulle à une distance de 0,1 mm de la surface de l'échantillon d'aluminium.

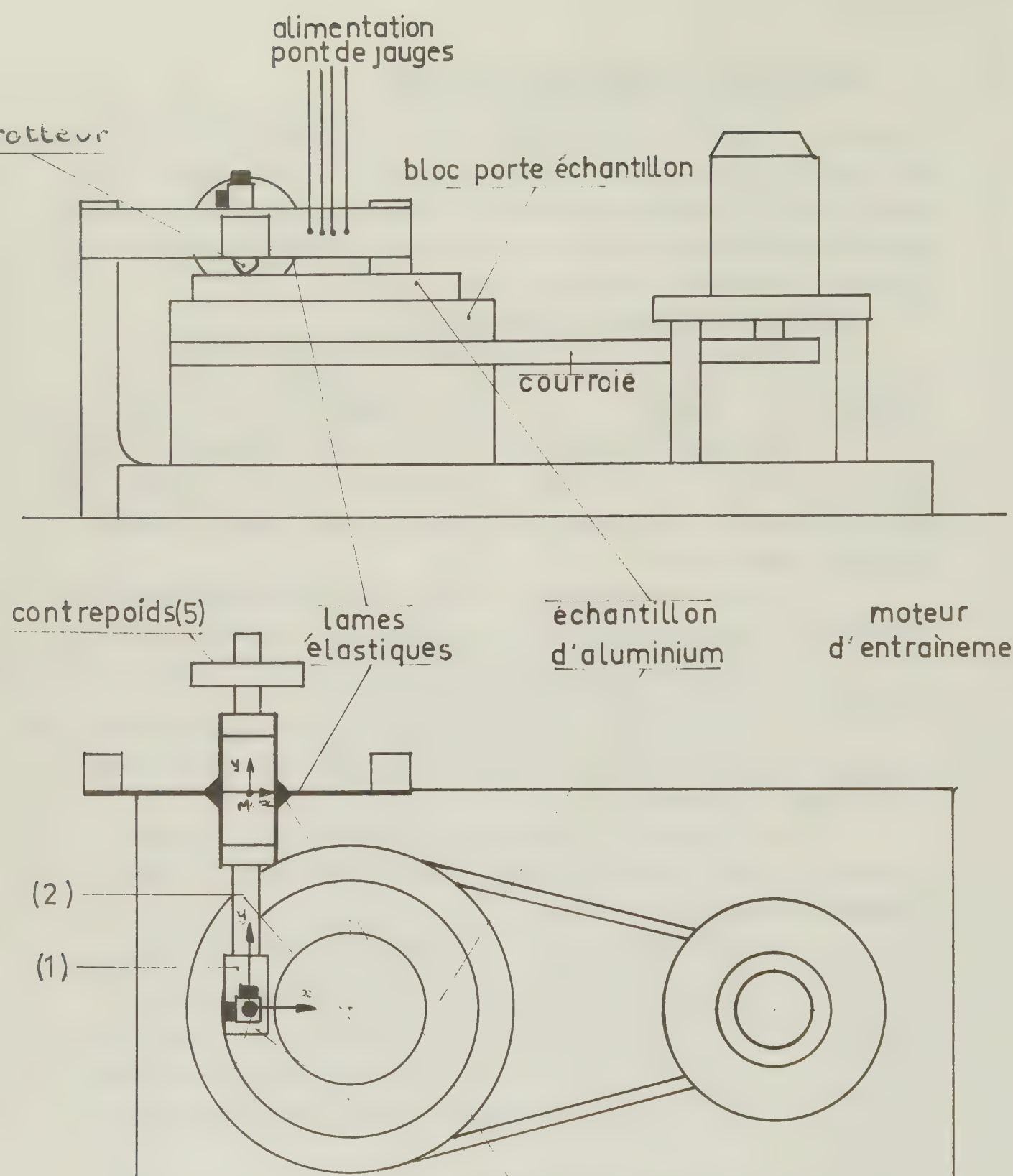
4°) Un crochet auquel on peut attacher un fil qui s'enroulant autour d'une poulie permet d'étalonner la chaine de mesure de la force de frottement par des poids marqués.

Les cotes du montage ont été déterminées de façon que l'axe de la tige cylindrique (2) soit perpendiculaire à la fibre neutre des lames (3) et que la direction $M''y$ soit parallèle à la vitesse de glissement $\vec{U}$. La charge, constituée par des poids marqués, est placée sur un plateau solidaire d'un crochet, dont le point d'ancrage est sur la verticale du point de contact. Le centre de gravité de la charge se trouve donc sur la verticale du point de contact.

I - 4 Mesures de la force de frottement

Les lames de mesure fléchissent sous l'effet de la force de frottement $\vec{T}$. Sur ces lames, près de leur encastrement sur le bâti de la machine, on a collé des jauges d'extensométrie, assemblées en pont de Wheastone.Chaque branche du pont comprend deux jauges pour éviter que la rotation du bras porte-frotteur autour de l'axe $M''z$ soit à l'origine d'une modification de la tension électrique proportionnelle à la force de frottement.

.../...



Tribomètre à mouvement rotatif dispositif porte_frotteur n°

Le pont de jauges est alimenté en courant continu et la tension qu'il délivre, sous l'effet des déformations des lames, est amplifiée par un amplificateur à courant continu dont la bande passante est supérieure à 20 kHz à 0,3 db.

La tension électrique proportionnelle à la force de frottement a été enregistrée sur les appareillages suivants :

1°) Un enregistreur graphique

2°) Un enregistreur magnétique grâce auquel on peut ensuite étudier le signal sur un oscillographe bicanal à mémoire. Ces études sont facilitées par le fait que les vitesses de lecture peuvent être plus lentes que les vitesses d'enregistrement.

3°) Un calculateur analogique numérique décrit ci-après.

I - 5 Mesure et enregistrement des accélérations

Sur la face supérieure du parallèlépipède porte-frotteur, on a vissé un capteur triaxial d'accélérations. Ce sont des capteurs piézoélectriques dont le schéma est tracé sur la figure 81.

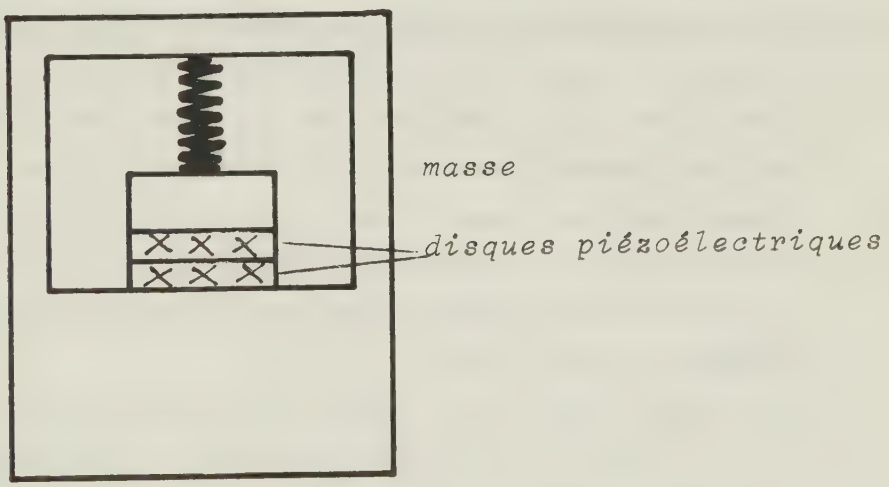


Figure 81

Sous l'effet de sa force d'inertie, une masse déforme des disques piézoélectriques. Ceux-ci fournissent une quantité d'électricité proportionnelle à l'accelération. Les axes de plus grande sensibilité sont orientés parallèlement aux directions $\vec{Mx}$, $\vec{My}$, $\vec{Mz}$.

.../...

La quantité d'électricité fournie par un capteur est de l'ordre de 10 picocoulombs par g. Elle est transformée en tension par un amplificateur de charge.

A la sortie de l'amplificateur de charge, le signal est enregistré sur un enregistreur magnétique à 4 voies, puis analysé sur un oscillographe bicanaux à mémoire ou sur un calculateur analogique numérique décrit ci-dessous

Sur la planche 6, on peut voir la photographie du tribomètre et des différents appareils constituant les chaines de mesure et d'analyse de la force de frottement et des accélérations du porte-frotteur.

A l'aide du dispositif n° 1, on peut enregistrer simultanément les tensions électriques représentant la force de frottement et les accélérations du frotteur dans les trois directions $\acute{M}y$, $\acute{M}z$, $\acute{M}x$. On peut ensuite à l'aide de l'oscillographe bicanaux à mémoire, les étudier et les comparer deux à deux. Pour étudier les accélérations, on a utilisé comme signal de référence la force de frottement, car c'est celui qui a été le plus étudié dans la littérature

I - 6 Calculateur analogique numérique

Quand on examine la courbe indiquant la variation de la force de frottement en fonction du temps, on s'aperçoit qu'elle évolue souvent, comme si, à un phénomène variant de façon continue, se superpose un phénomène variant de façon aléatoire. On peut faire la même observation quand on étudie l'accélération du frotteur dans une direction déterminée. C'est pourquoi, il est intéressant d'obtenir un critère statistique, tel que l'histogramme d'amplitude pour caractériser l'allure du phénomène étudié pendant une certaine durée. L'étude de ce critère en mécanique des surfaces est récent. Il a été utilisé surtout pour caractériser les états de surface micro-géométrique [166 à 168]

Dans cette étude, nous avons utilisé un calculateur analogique et numérique pour l'étude de la force de frottement et des accélérations du frotteur dans les directions $\acute{M}y$, $\acute{M}z$, $\acute{M}x$.

Cet appareil (appelé Elatron) permet de faire l'analyse statistique en temps réel d'une tension continue dont l'allure en fonction du temps peut être aléatoire. On peut en particulier obtenir l'histogramme d'amplitude du signal analysé.

Rappelons que l'histogramme d'amplitude d'une variable x est la probabilité de présence de la variable x dans un intervalle $(x_o - \mathcal{E}, x_o + \mathcal{E})$ en fonction de x_o. La largeur choisie pour l'intervalle dépend du problème posé

.../...

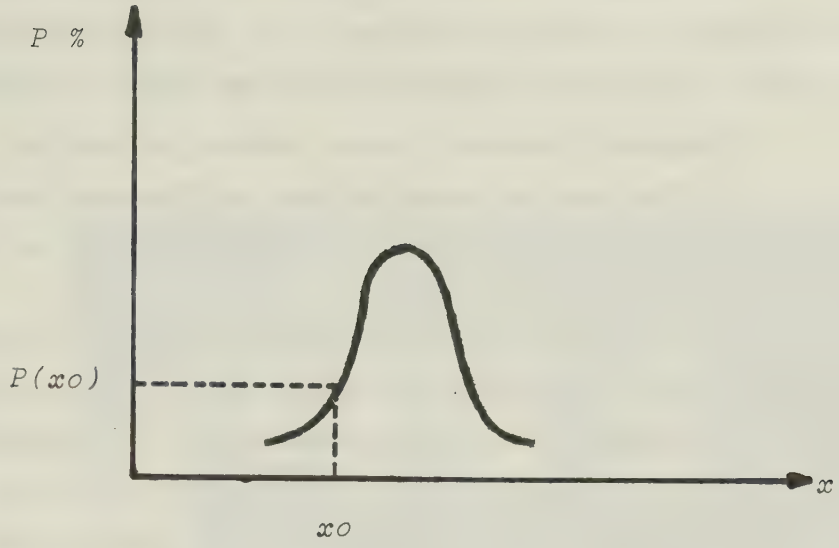


Figure 82 : courbe de densité de probabilité

L'appareil que nous avons utilisé produit une courbe déduite de la précédente par affinité. En ordonnée, on porte le nombre de fois où la valeur $x\ (x_o - \varepsilon\ ,\ x_o + \varepsilon)$ a été comptée pendant le temps d'échantillonnage.

N étant le nombre total d'échantillons de la population étudiée

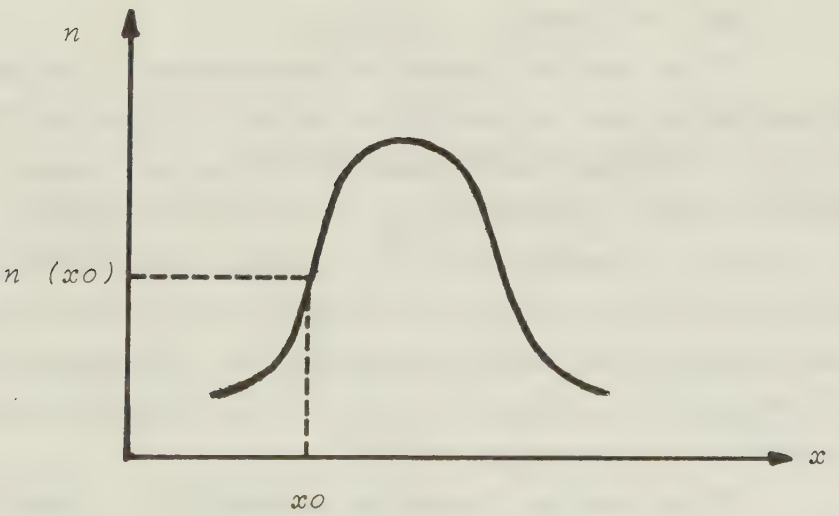


Figure 83 : histogramme d'amplitude

.../...

Une courbe à la base resserrée et à maximum élevé est caractéristique de faible variation et de stabilité du paramètre analysé, au contraire une courbe aplatie traduit une grande dispersion de valeurs.

L'appareil comprend quatre parties principales :

1°) Une base de temps, réglant la fréquence des échantillonnages. A intervalles de temps réguliers, 0,1 ms par exemple, on mesure la tension représentant le phénomène étudié.

2°) Un convertisseur analogique numérique transforme le signal mesuré en un nombre binaire codé décimal directement assimilable par la mémoire. Le taux de conversion doit être compatible avec la fréquence d'échantillonnage.

3°) Une mémoire à tores de ferrite de 1600 mots, d'une capacité de 10^6, c'est-à-dire 24 bits en décimal codé binaire, permet une mémorisation de l'information. On peut utiliser tout ou partie des 1600 canaux de l'appareil par le réglage de la dimension du sous-groupe de la mémoire sur lequel on désire travailler. Pour un sous-groupe de 400 canaux, les canaux d'origine peuvent être 0,400, 800 ou 1200, c'est-à-dire que l'on peut exploiter les canaux de 0 à 399, 400 à 799, 800 à 1199, 1200 à 1599.

4°) Un chassis de visualisation et de sortie des informations dépouillées. Un bloc de comptage permet de connaître l'abscisse et l'ordonnée d'un point. Nous avons monté une caméra sur ce châssis de visualisation afin de photographier les courbes obtenues.

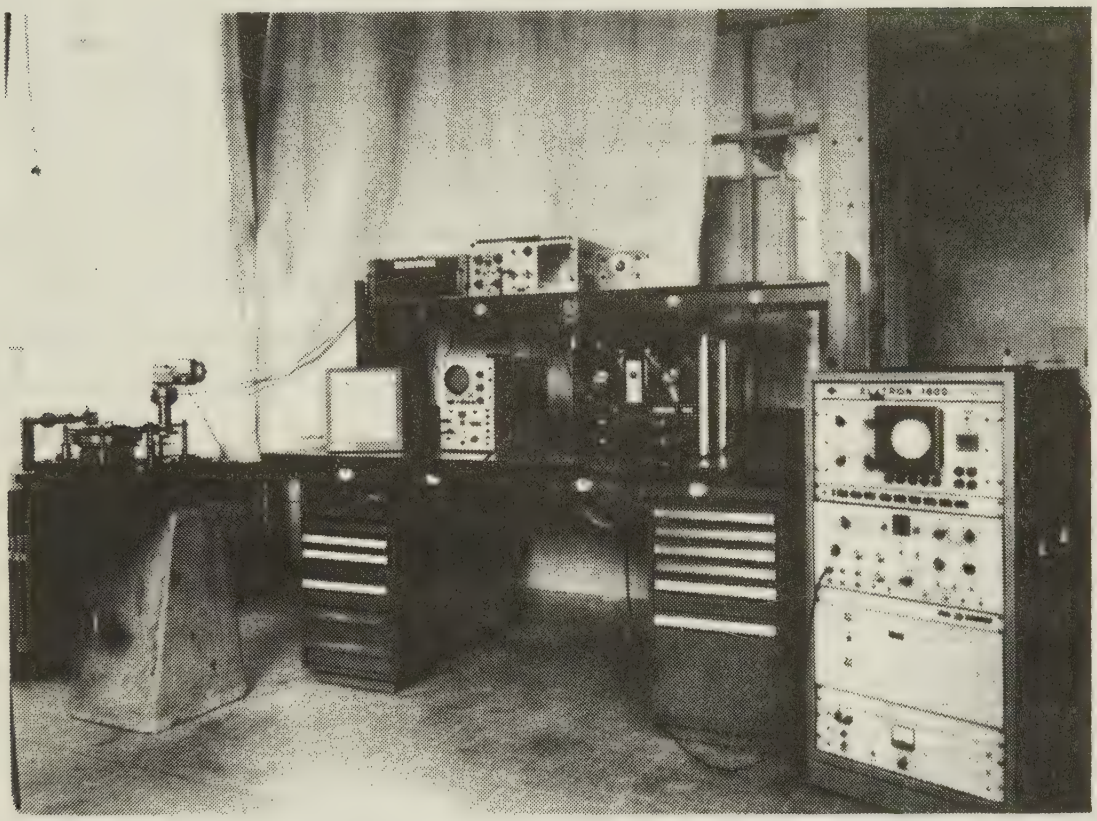
Etalonnage

Deux cas peuvent se présenter :

1°) La tension électrique représentant le phénomène étudié varie entre une valeur zéro et une valeur maximale en gardant toujours le même signe. C'est le cas du signal électrique délivré par les jauges d'extensométrie, branchées en pont de Wheastone, et qui servent à mesurer la force de frottement dans le cas du tribomètre rotatif. Au canal zéro, on fait correspondre la tension zéro et au dernier canal la valeur de la tension maxima d'étalonnage. Si, par exemple, nous avons une dimension de sous-groupe de 200 canaux, on fait correspondre au canal 199 (200 - 1) la tension électrique représentant un coefficient de frottement de 0,5.

2°) La tension électrique représentant le phénomène étudié varie de part et d'autre de la valeur zéro en prenant alternativement des valeurs négatives ou positives. C'est ainsi que se présentent les signaux émis par les capteurs d'accélération piézoélectriques fixés sur le porte-frotteur du

.../...



Photographie du tribomètre à mouvement rotatif équipé du dispositif porte-frotteur n° 1, et des appareillages constituant la chaine de mesure et d'analyse de la force de frottement et des accélérations du porte-frotteur.

Planche 6

tribomètre rotatif et les lames encastrées travaillant en flexion, sur le tribomètre alternatif. Si la dimension du sous-groupe est de 200 canaux, on fait correspondre au canal 100 la tension zéro, et aux canaux zéro et 199 les tensions maximales d'équilibrage, négatives et positives respectivement.

Pour étalonner l'axe des amplitudes des histogrammes d'amplitude des différentes accélérations du porte-frotteur, l'amplificateur de charge délivre un signal d'étalonnage sinusoïdal de 10 volts crête à crête à la fréquence de 1 000 Hz. Ces 10 volts représentent la pleine échelle de l'amplificateur suivant le calibre choisi. Si l'appareil est réglé sur le calibre 1 g, 10 volts correspondent à une accélération de 1 g.

Dans le cas du tribomètre alternatif, si la dimension du sous-groupe est 200, on fait correspondre au canal 100 la tension zéro, et aux canaux 0 et 199 les tensions délivrées par les jauges collées en pont de Wheastone, lorsque les lames sont sollicitées par les forces maximales d'étalonnage. On peut ainsi graduer directement en coefficient de frottement l'axe des amplitudes.

I - 7 Description du dispositif expérimental n° 2

Dans la première partie de notre travail, nous avons montré que la variation de la force de frottement en fonction du temps traduit les détériorations subies par l'échantillon d'aluminium au cours de ses passages successifs sous un frotteur en acier. Aussi, nous avons construit un deuxième porte-frotteur qui, d'une part, permet la mesure de la force de frottement et, d'autre part, donne la possibilité de faire plusieurs traces sur l'échantillon d'aluminium. Cette possibilité est particulièrement intéressante lorsque l'échantillon d'aluminium est préparé par un procédé tel que le polissage électrolytique en bain Jacquet (169), technique qui est délicate avec des pièces de la taille de celles que nous utilisons.

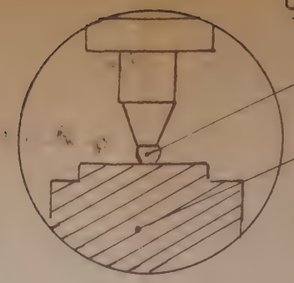
Le frotteur en acier, quand il est hémisphérique a les mêmes dimensions que celles qu'il avait lors de l'utilisation du premier porte-frotteur. Quand c'est une bille d'acier à roulement, cette dernière est serrée et centrée dans un porte-bille identique à celui qui sert à effectuer un essai de dureté Brinell.

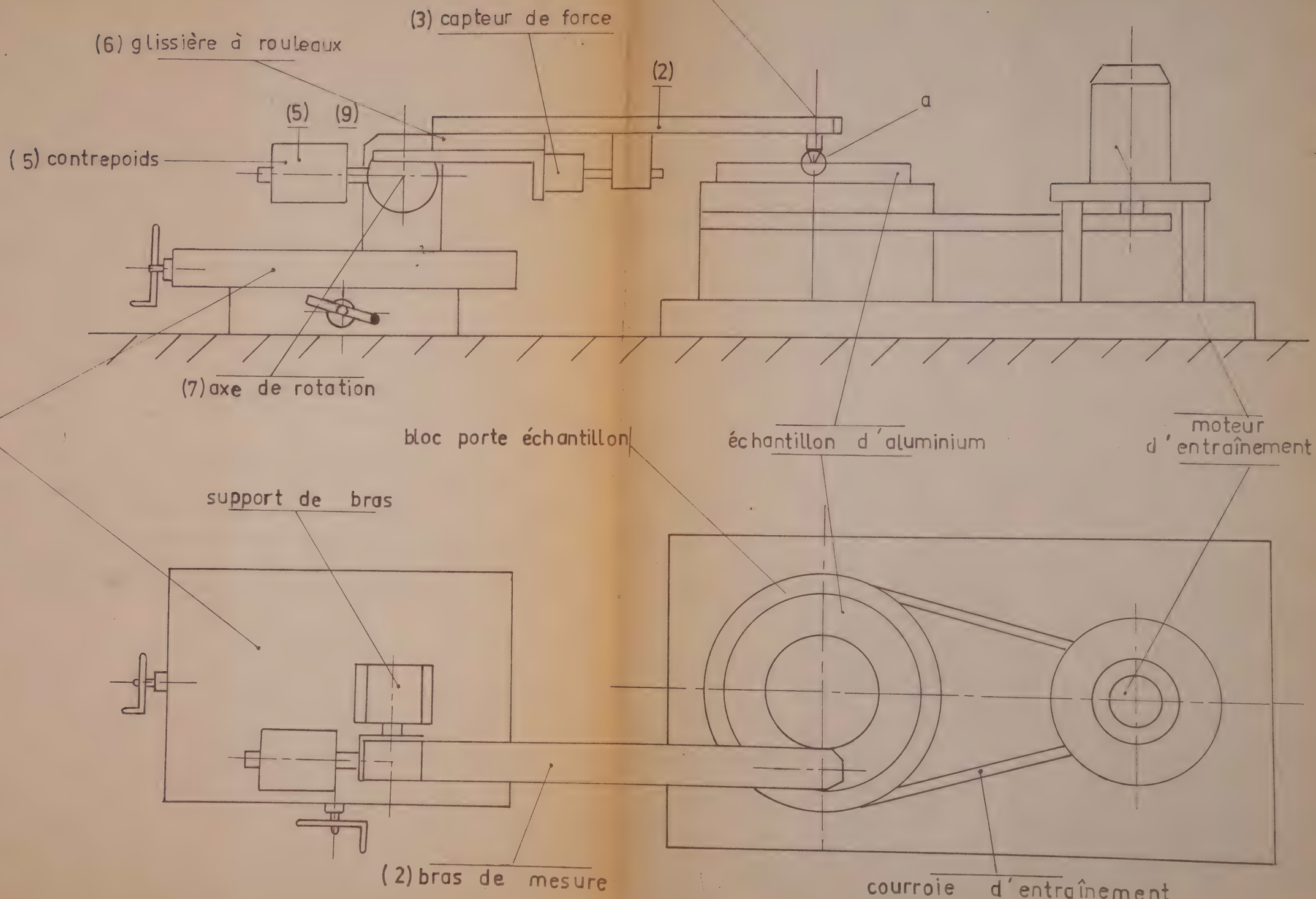
Sur la figure 84, on peut voir le schéma du dispositif utilisé.

Le frotteur (1) est solidaire d'une plaque rectangulaire (2), fixée sur la plaque mobile d'une glissière à rouleaux. Cette plaque rectangulaire est reliée à la partie fixe de la glissière à rouleaux par l'intermédiaire d'un capteur de force à mutuelle induction (3).

.../...

Tribomètre a mouvement rotatif
Dispositif porte-frotteur n° 2





L'ensemble du bras de mesure peut tourner autour d'un axe horizontal (7) monté dans son support sur roulements à billes. Un contre-poids (5) vissé sur une tige filetée (9) permet le réglage de la charge zéro, lorsque le crochet portant le plateau de chargement est placé sur le porte-frotteur.

Une table de fraiseuse, coulissant dans les directions $\vec{Mx}$ et $\vec{My}$ a pour but, d'une part, de rendre la direction $\vec{My}$ parallèle à la vitesse de glissement $\vec{U}$, et d'autre part, de déplacer le porte-frotteur de façon à pouvoir effectuer plusieurs traces sur l'échantillon d'aluminium.

I - 8 Mesure de la force de frottement

Sur la figure 85, on voit le schéma de la chaine de mesure de la force de frottement, elle comporte les éléments suivants :

1°) Un capteur à mutuelle induction. Une membrane métallique élastique subit des déformations proportionnelles à la force de frottement. Cette membrane est reliée à un noyau plongeur se déplaçant suivant l'axe d'un solénoïde. Ce dernier comprend les enroulements primaire et secondaire d'un transformateur différentiel.

2°) Un boitier d'alimentation comportant :

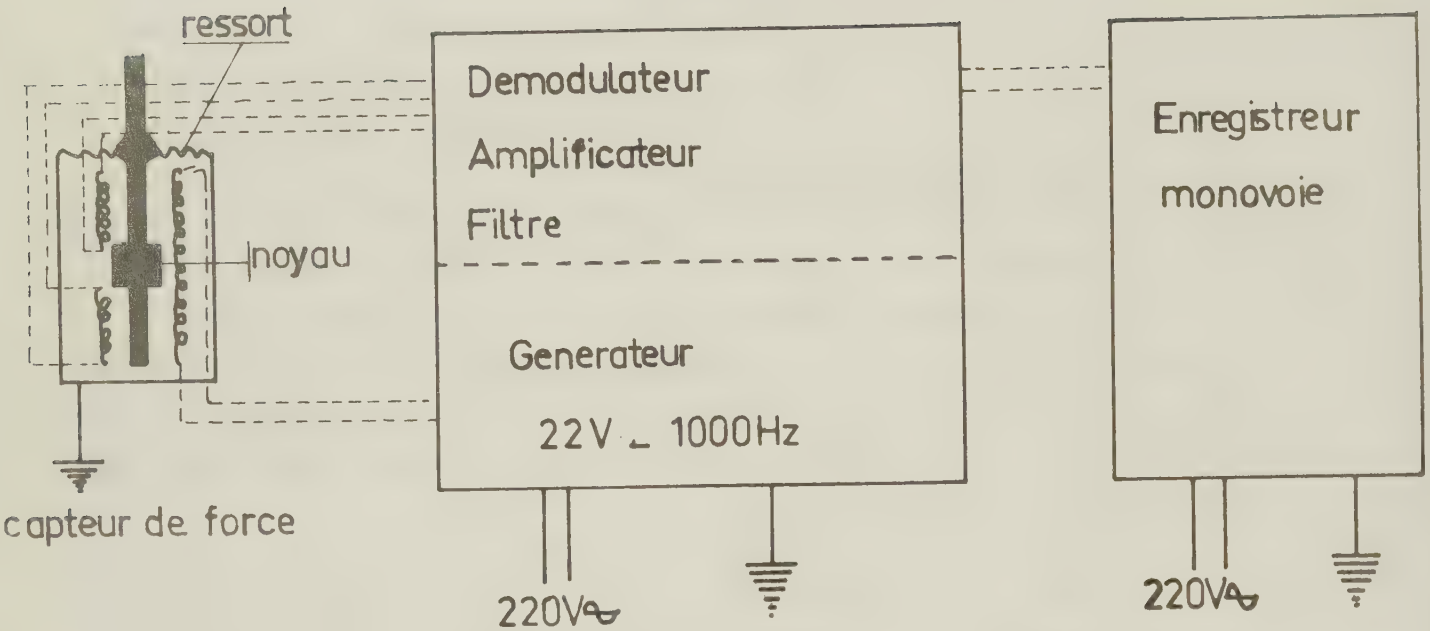
Un circuit générateur fournissant un signal porteur sinusoïdal de 1000 Hz alimentant l'enroulement primaire du transformateur différentiel.

Un circuit de mesure composé d'un démodulateur, d'un amplificateur et d'un filtre.

Un circuit de traçage permettant d'étalonner la chaine de mesure en simulant électriquement une grandeur arbitraire appliquée au capteur. On peut ainsi régler la sensibilité de la chaine de mesure sans avoir a mettre en oeuvre des moyens d'étalonnage physiques tels que des poids marqués.

3°) Un enregistreur potentiométrique sur lequel est tracée une tension électrique proportionnelle à la force de frottement

.../...



Performance

Gamme de mesure --------- 0_20N
Resolution maxi ---------- 0,05N
Bande passante du capteur 0_200 Hz

Chaine de mesure du capteur de force à variation de mutuelle induction

figure 85

II. TRIBOMETRE A MOUVEMENT ALTERNATIF

II - 1 Formes et dimensions des échantillons

L'échantillon d'aluminium, découpé dans une tôle, est une plaquette dont les dimensions sont les suivantes : épaisseur 2 mm, largeur 20 mm, longueur 50 mm.

Le frotteur en acier peut avoir une forme hémisphérique ou bien sphérique. Quand il a la forme d'une hémisphère, ses dimensions sont celles des frotteurs utilisés sur le tribomètre rotatif. Lorsque le frotteur est une bille d'acier à roulement, son mode de fixation dépend de son diamètre. Pour fixer et centrer une bille de 5 mm de diamètre, on utilise un porte-bille Brinell. Quand la bille a un diamètre de 20 mm, on utilise un porte-bille usiné qui se visse sur la glissière porte-frotteur.

II - 2 Description et fonctionnement du tribomètre à mouvement alternatif

Sur la figure 86, on peut voir le schéma du tribomètre à mouvement alternatif. Le porte-frotteur (2) est vissé sur la partie inférieure d'une glissière à billes (3). Cette glissière à billes qui peut coulisser verticalement porte un plateau à sa partie supérieure. Pour définir la charge, on peut placer des poids marqués sur ce plateau. L'effort normal sur la bille sera donc la somme des poids marqués placés sur ce plateau et des poids propres de la glissière à bille et du porte-frotteur. La glissière à billes est montée sur un support fixe, solidaire du bâti de la machine.

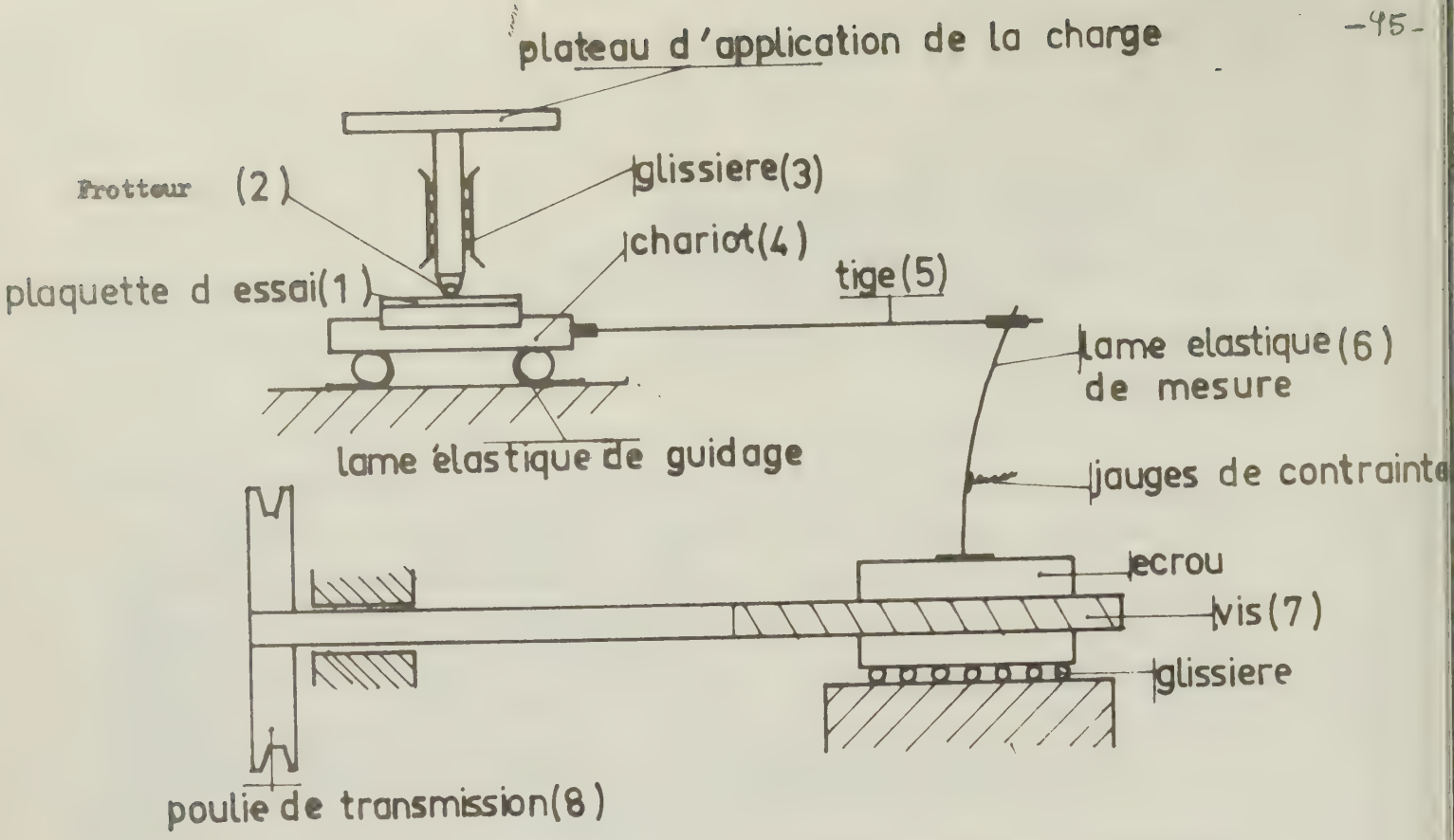
La plaquette d'aluminium est maintenue par deux vis sur un porte-échantillon. Ce dernier est fixé sur un plateau mobile (4). Ce plateau se déplace sur des rouleaux guidés en translation par des lames métalliques souples. Le plateau est tiré et poussé par une tige (5) fixée sur les lames de mesure (6) de la force de frottement. Ces lames sont encastrées sur un chariot mobile en translation. Le mouvement du chariot est commandé par la rotation d'une vis (7) entrainée par une poulie de transmission. Une courroie trapézoïdale relie la poulie au moteur d'entraînement. L'inversion du mouvement est obtenue mécaniquement. Un axe, solidaire du chariot porte-lame fait basculer en fin de course un commutateur commandant l'alimentation du moteur électrique.

II - 3 Chaîne de mesure de la force de frottement

Elle comprend les éléments suivants :

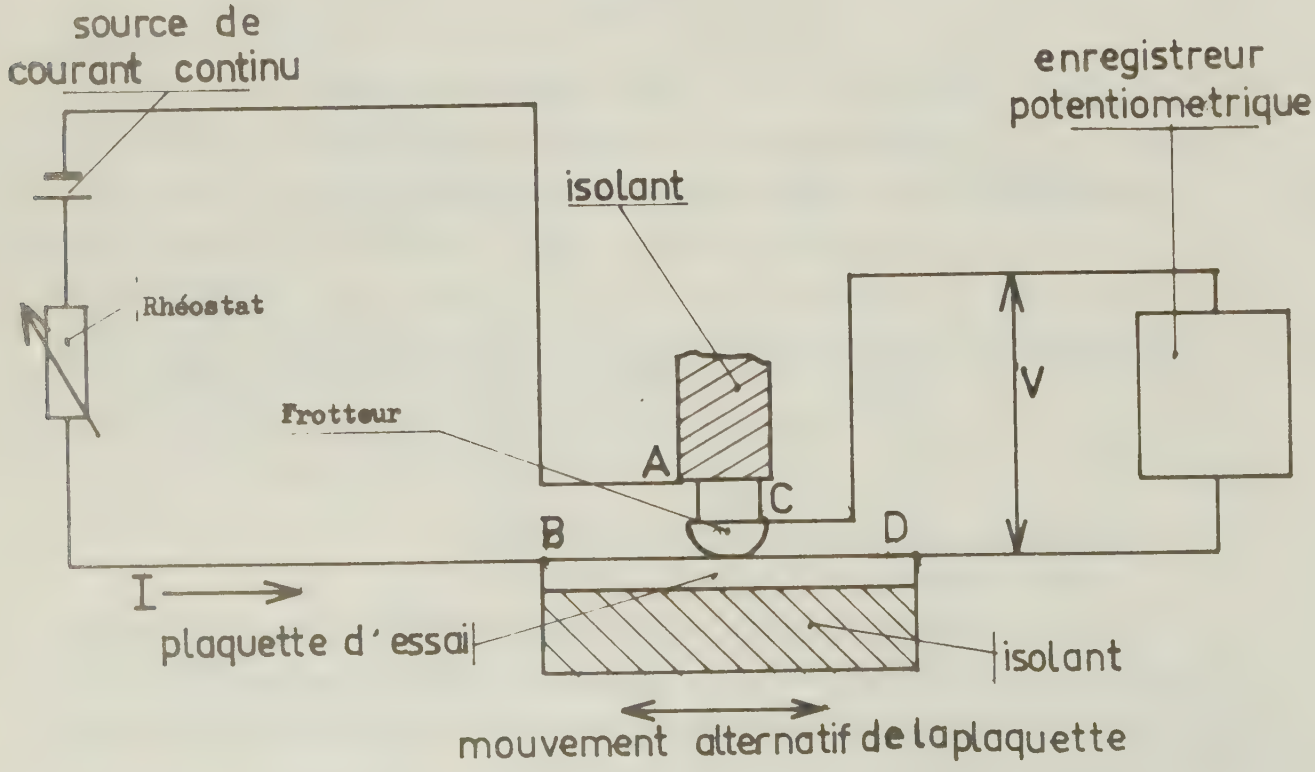
1°) Un capteur de force, c'est la lame élastique servant à pousser le plateau porte-échantillon. Pour étalonner la déformation élastique de la lame, on a collé sur sa partie inférieure, près de l'encastrement, des jauges d'extensométrie assemblées en pont de Wheastone.

.../...



Frictiographe alternatif

fig 8



Mesure de la resistance de contact

fig 87

2°) Un boitier servant à alimenter le pont de Wheastone en courant continu et à amplifier le signal délivré par le pont de jauges lorsque la lame de mesure fléchit sous l'action de la force de frottement.

3°) Un enregistreur potentiométrique sur lequel on voit évoluer en fonction du temps, la tension électrique proportionnelle à la force de frottement.

Le plateau porte-échantillon porte à ses extrémités des crochets. A ces derniers, on fixe un fil tirant dans la direction du frottement sur les lames de mesure. On peut ainsi, par l'utilisation de poids marqués, étalonner la chaine de mesure.

II - 4 Mesure de la résistance de contact

La méthode de mesure présentée ci-dessous a été utilisée de façon systématique par Bowden (170) pour étudier l'aire de contact au cours du glissement. Elle donne des résultats dont l'interprétation est délicate, mais comme nous étudions la phase initiale de l'usure d'échantillons d'aluminium, il nous a paru intéressant de faire des mesures de résistance de contact. En effet, si l'aluminium est un très bon conducteur, son oxyde, qui, dans les conditions de nos expériences le recouvre en permanence est un isolant.

Sur la figure 87, on peut voir le schéma de la chaine de mesure de la résistance de contact.

Le frotteur en acier et l'échantillon d'aluminium sont fixés sur des supports isolants en matière plastique. Le courant qui passe entre les pièces frottantes est fourni par une alimentation stabilisée. Grâce à un rhéostat, on peut régler l'intensité du courant à une valeur qui est de l'ordre de 1 A. La tension est mesurée entre les points C et D, pour éviter que des erreurs soient introduites par les résistances de contact aux points A et B entre les fils d'amenée de courant et les pièces frottantes. La tension entre le frotteur et l'échantillon est lue sur un enregistreur potentiométrique.

III.-PREPARATION DES SURFACES

En raison de l'importance du facteur nature des matériaux, nous allons décrire de façon détaillée les procédés d'obtention des couches superficielles.

III - 1 Préparation des surfaces des échantillons d'aluminium

Les différents états de surface des échantillons d'aluminium avant traitement thermique sont définis par les processus suivants

III - 1.1 Usinage

Tournage

Les paramètres d'usinage sont les suivants :

- ébauche : vitesse de coupe 120 m/min. avance 0,5 mm
- finition : " " 240 m/min. " 0,2 mm
- superfinition: " " 360 m/min. " 0,05 mm

Les opérations de tournage sont suivies d'un polissage à la toile abrasive et d'un avivage par tampons de coton imprégnés de produit abrasif, vert de chrome par exemple.

Polissage par papier abrasif

La pièce étant placée sur un tour, on polit la surface destinée au frottement à l'aide d'un papier abrasif de grade 220. Les stries de polissage sont parallèles à la vitesse de glissement.

Polissage à l'alumine

La surface de l'échantillon est préparée par polissage sous eau en l'abrasant à l'aide de papiers abrasifs de grade 300, 500, 800. Le dernier polissage se fait à l'aide d'un disque de feutre imprégné d'alumine 24 H.

Polissage électrolytique au tampon

Le polissage se fait en déplaçant manuellement un tampon imbibé d'électrolyte sur la surface à polir.

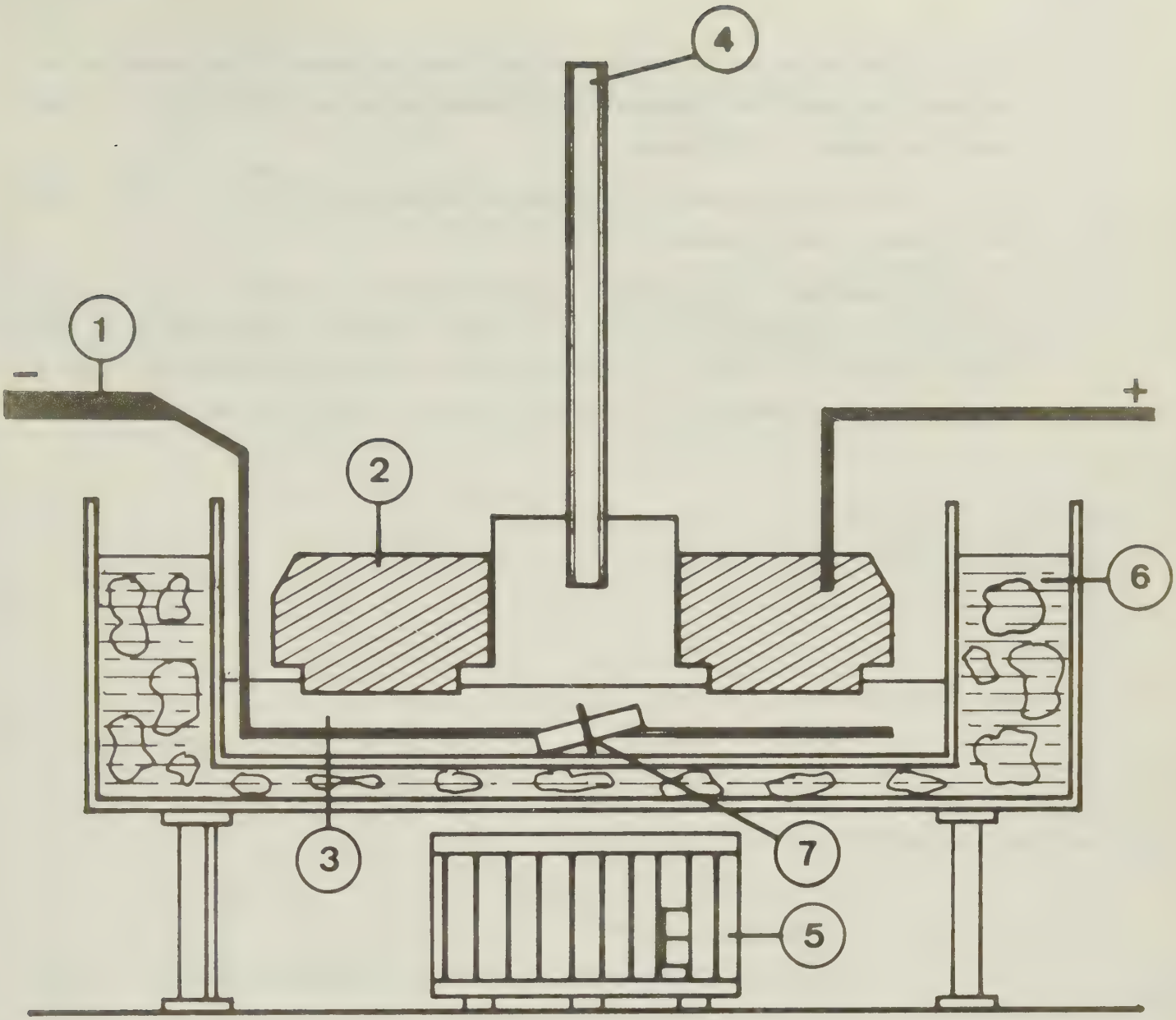
Polissage électrolytique en bain Jacquet (164)

Ce bain est un mélange d'anhydride acétique et d'acide perchlorique. mélangés dans les proportions voluniques suivantes : $\frac{2}{3}$ d' anhydride acétique et $\frac{1}{3}$ d'acide perchlorique.

La figure 88 montre le croquis du montage utilisé dans le cas des échantillons utilisés sur le tribomètre rotatif.

Pour limiter les dangers inhérents à l'utilisation de ce bain (191) tout en obtenant un polissage correct, on a pris les dispositions suivantes :

- volume du mélange lirité à 500 ml



légende

1 - Cathode - plaque en acier inoxydable

2 - Anode - Echantillon d'aluminium à polir

3 - Bain électrolytique

4 - Tige support

5 - Entrainement de l'agitateur magnétique

6 - Liquide réfrigérant

7 - Agitateur

MONTAGE POUR POLISSAGE ELECTROLYTIQUE DES ECHANTILLONS D'ALUMINIUM

Fig. 88

- limitation de la température atteinte en cours de polissage en immergeant pendant 5 mn l'échantillon d'aluminium et en refroidissant le bain avant et pendant le polissage.

Dans ces conditions la température du bain croît de 0° C à 20° C quand le polissage dure 20 minutes.

La tension est de 27 volts et l'intensité du courant de 2 A, ce qui correspond à une densité de courant de 2 A/dm^2. Dans ces conditions on se place dans la partie utile BC de la caractéristique intensité tension qui sert à déterminer les conditions de polissage électrolytique Fig.(89) ;

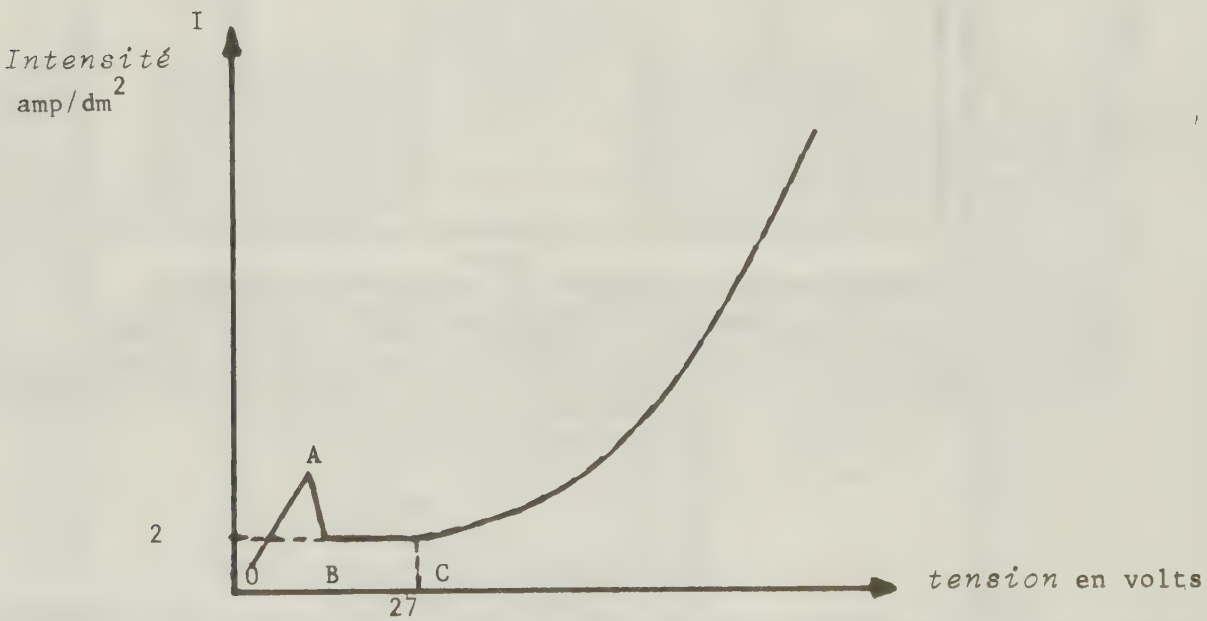


Fig. 89

Fig.(89) d'après [172] - Détermination des conditions de polissage électrolytique d'un métal

III-1-2 - Nettoyage des surfaces des échantillons d'aluminium

Avant traitement thermique les surfaces préparées par tournage et avivage sont nettoyées par frottement à l'aide d'un tampon de coton imprégné de trichloréthylène pour le premier nettoyage, puis d'éther sulfurique pour le second.

Les échantillons dont les surfaces ont été préparées par polissage sur papier abrasif et sur disque de feutre imprégné d'alumine sont recuits sans nettoyage préalable.

Après le polissage électrolytique les échantillons d'aluminium sont rincés à l'eau distillée et l'alcool éthylique. Le séchage se fait sous jet d'air chaud.

III-1-3 - Traitement thermique

Après usinage et nettoyage, les échantillons sont placés dans un four à haute température. Après recuit, ils sont retirés du four, dans tous les cas le refroidissement des pièces s'effectue dans l'atmosphère du laboratoire.

III-2 - Préparation des surfaces des frotteurs en acier

III-2-1 - Elaboration

La calotte sphérique des frotteurs en acier est usinée par tournage, polissage sur des papiers abrasifs de différents grades puis sur des tampons imprégnés de pâte diamantée de grosseur de grains décroissante : (15 μm, 7 μm, pâte A).

Les billes d'acier à roulement sont utilisées sans préparation préalable.

III-2-2 - Nettoyage

Avant essai, tous les frotteurs en acier sont dégraissés par immersion dans une cuve à ultra-sons contenant du trichloréthylène.

IV - MODE OPERATOIRE

Les chaînes de mesure étant réglées et étalonnées, on répand le lubrifiant sur l'échantillon d'aluminium. Puis on amène progressivement le frotteur chargé au contact de la pièce antagoniste. La vitesse de descente du frotteur et de la charge se règle manuellement, la durée de mise en charge est d'environ 20 secondes. Le glissement de l'échantillon d'aluminium commence une minute environ après que la mise en contact entre les pièces frottantes a été établi. Cette durée, identique à celle qui est utilisée lorsque l'on fait un essai classique de dureté Brinell, permet un fluage des couches superficielles.

TROISIEME PARTIE

ETUDE EXPERIMENTALE DE L'USURE DE L'ALUMINIUM RECUIT

CHAPITRE I - EXISTENCE DE TROIS PHASES SUCCESSIVES DANS LE FROTTEMENT DE L'ACIER SUR DE L'ALUMINIUM RECUIT, LUBRIFIE PAR DE L'HUILE DE VASELINE SURRAFFINÉE.

I. CONDITIONS INITIALES

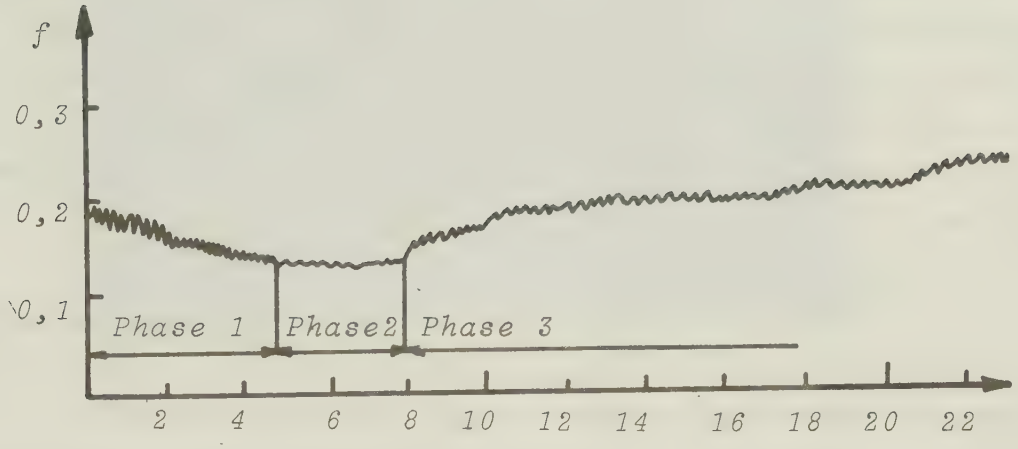
Dans les expériences décrites ci-après, effectuées à l'aide du porte-frotteur n° 1, les conditions initiales du frottement étaient les suivantes :

- Frotteur hémisphérique, diamètre de la calotte sphérique:26 mm
- Ambiance : huile de vaseline
- Charge 1 daN
- Vitesse de glissement 4,07 mm/s
- Le frotteur est en acier mi-dur, l'aluminium est de nuance A 5 (99,50% de pureté).
- L'état de surface du frotteur avant glissement est obtenu par polissage à la pate diamantée. Celui de l'échantillon d'aluminium est obtenu par avivage. Le nettoyage des surfaces a été précisé au paragraphe III-1-2. Le traitement de recuit de l'échantillon d'aluminium consiste à le placer 45 minutes à une température de 600° C. dans un four aéré, pour préciser certains points on fera appel à des résultats obtenus à l'aide du tribomètre alternatif. Les conditions initiales seront indiquées dans chaque cas.

II. VARIATION DE LA FORCE DE FROTTEMENT AU COURS DU TEMPS

La figure 90 montre la variation de la force de frottement en fonction du nombre de passages. C'est un enregistrement caractéristique, choisi parmi d'autres qui présentent les trois phases de façon plus ou moins marquée. La deuxième phase peut être courte ou même ne pas exister.

.../...



Nombre de passages d'un point de l'échantillon d'aluminium sous le frotteur en acier

Variation du coefficient de frottement en fonction du nombre de passages d'un point du plan d'aluminium sous le frotteur.

Fig. 90

Sur cette courbe on peut observer l'existence de trois parties distinctes :

1. La force de frottement, irrégulière lors des premiers tours, diminue lors des passages successifs.
2. Elle atteint assez rapidement une valeur minimale et régulière caractérisant la seconde phase.
3. Au bout d'un certain temps elle s'élève de nouveau en devenant irrégulière, ce comportement se poursuit pendant la durée de la troisième phase et conduit à la destruction de la surface frottée.

Pour être en mesure de caractériser les différentes phases on a enregistré sur bande magnétique les tensions électriques représentant la force de frottement et les accélérations du porte-frotteur.

Les transformations et endommagements des surfaces des échantillons d'aluminium ont été mis en évidence par les méthodes suivantes : répliques par vernis polymérisable à froid, profilométrie électro-mécanique, micrographie électronique, mesure de la résistance de contact, microdureté, étude de la recristallisation, écrouissage préalable de la piste.

.../...

III. ETUDE DETAILLEE DE LA FORCE DE FROTTEMENT ET DES ACCELERATIONS DU PORTE-FROTTEUR AU COURS DES DIFFERENTES PHASES.

On a enregistré simultanément sur bandes magnétiques les tensions électriques représentant la force de frottement et les accélérations. L'enregistrement se fait dès l'instant du démarrage, et dure jusqu'à ce que l'échantillon d'aluminium ait effectué 274 rotations. L'analyse de ces signaux est effectuée ensuite sur les parties de la bande enregistrée qui correspondent aux trois phases reconnaissables sur le diagramme de frottement de la figure 90.

III - 1 Force de frottement

Le signal, enregistré est analysé par l'Elatron pendant une durée de 76 secondes. Cette durée est légèrement inférieure à celle qui est nécessaire à l'échantillon d'aluminium pour faire un tour complet.

L'analyse est déclenchée au début des premier, troisième et vingt-deuxième tours, ce qui correspond à l'apparition des différentes phases. La figure 91 montre l'allure de l'histogramme d'amplitude. Le tableau 3, donne les coordonnées des points les plus caractéristiques des histogrammes obtenus au cours de chaque phase.

Points	Phase 1		Phase 2		Phase 3	
	f	Nombre de caractères	f	Nombre de caractères	f	Nombre de caractères
f_1, n_o			0,08	4	0,17	2
f_2, n_1			0,14	1503	0,22	599
f_3, n_2	0,28	313	0,14	1503	0,31	643
f_4, n_o	0,32	2	0,21	3	0,35	10

Coordonnées des points caractéristiques des histogrammes d'amplitude du coefficient de frottement obtenus au cours de chaque phase.

Tableau 3

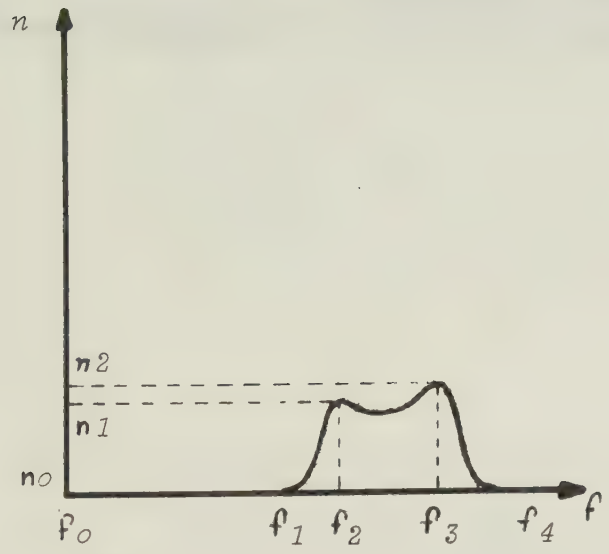
Sur la planche 7 on peut voir les photographies des histogrammes d'amplitude correspondant aux différentes phases. La forme de ces courbes s'explique en considérant la variation de la force de frottement en fonction du temps au cours de chaque phase (planche 8, 1b,2b,3b, comme on l'a expliqué au paragraphe I - 6 de la deuxième partie.

.../...

Histogramme d'amplitude du coefficient de frottement correspondant aux différentes phases.
Conversion 400, dimension 200, base de temps 1m/s, échelle horizontale 200

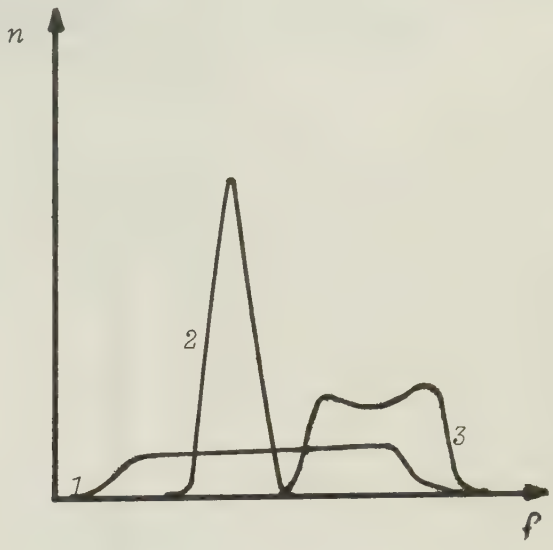
Planche 7

La figure(92)montre le tracé sur un même graphique des histogrammes d'amplitude du coefficient de frottement au cours de chaque phase



allure générale de l'histogramme d'amplitude du coefficient de frottement

Fig. 91



Histogramme d'amplitude du coefficient de frottement au cours des différentes phases.

Phase 1 92 - 1

Phase 2 92 - 2

Phase 3 92 - 3

Fig. 92

La différence ainsi mise en évidence entre les phases est plus nette que ne pourrait l'indiquer l'enregistrement de la force de frottement à l'aide d'un enregistreur graphique.

III - 2 Accélérations

Des capteurs piézoélectriques nous permettent de mesurer l'amplitude des accélérations dans les directions $\ddot{M}_y$, $\ddot{M}_z$, $\ddot{M}_x$. $\ddot{M}_y$ est parallèle à la vitesse de glissement $\vec{U}$, $\ddot{M}_z$ est perpendiculaire à la surface de l'échantillon d'aluminium, et $\ddot{M}_x$ est la direction perpendiculaire aux deux précédentes.

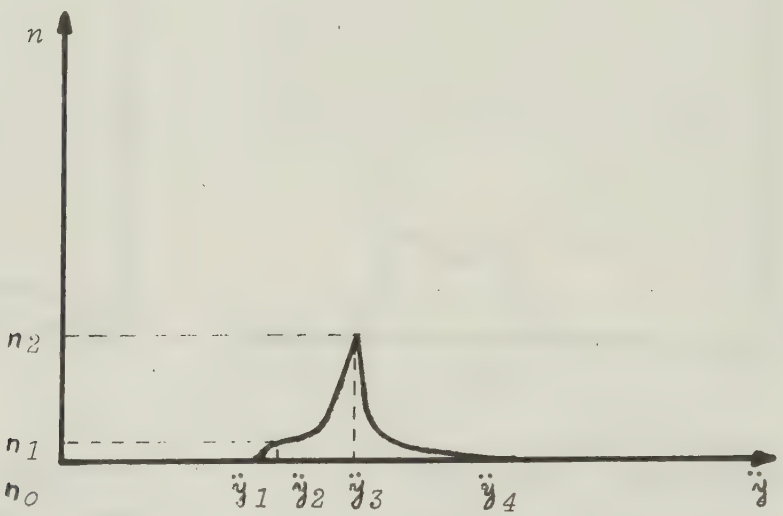
Les tensions électriques représentant les accélérations du frotteur selon les trois directions $\ddot{M}_y$, $\ddot{M}_z$, $\ddot{M}_x$ sont enregistrées simultanément sur bande magnétique. Le processus d'analyse est identique à celui qui a été décrit dans le cas de la force de frottement. Il est déclenché au début des premier, troisième et vingt-deuxième tours, ce qui correspond à l'apparition des différentes phases.

.../...

III - 2 - 1 Accélération $\ddot{y}$ - (Dans la direction de la vitesse de glissement)

III - 2 - 1 - a Histogramme d'amplitude

La figure 93 montre l'allure de l'histogramme d'amplitude



Histogramme d'amplitude de l'accélération du frotteur dans la direction de la vitesse de glissement.

Fig. 93

Le tableau 4 donne les coordonnées des points les plus caractéristiques des histogrammes, obtenus au cours de chaque phase.

Points	Phase 1		Phase 2		Phase 3	
	$\ddot{y}$	Nombre de caractères	$\ddot{y}$	Nombre de caractères	$\ddot{y}$	Nombre de caractères
$\ddot{y}_1$, n_o	- 0,4 g	5	- 0,16 g	1	- 0,22 g	1
$\ddot{y}_2$, n_1	- 0,3 g	248	- 0,02 g	3202	- 0,13 g	917
$\ddot{y}_3$, n_2	- 0,03g	1503	- 0,02 g	3202	0	1827
$\ddot{y}_4$, n_3	+ 0,48g	2	+ 0,17 g	6	+ 0,2 g	14

Coordonnées des points caractéristiques des histogrammes d'amplitude de l'accélération du frotteur, dans la direction du glissement, obtenus au cours de chaque phase.

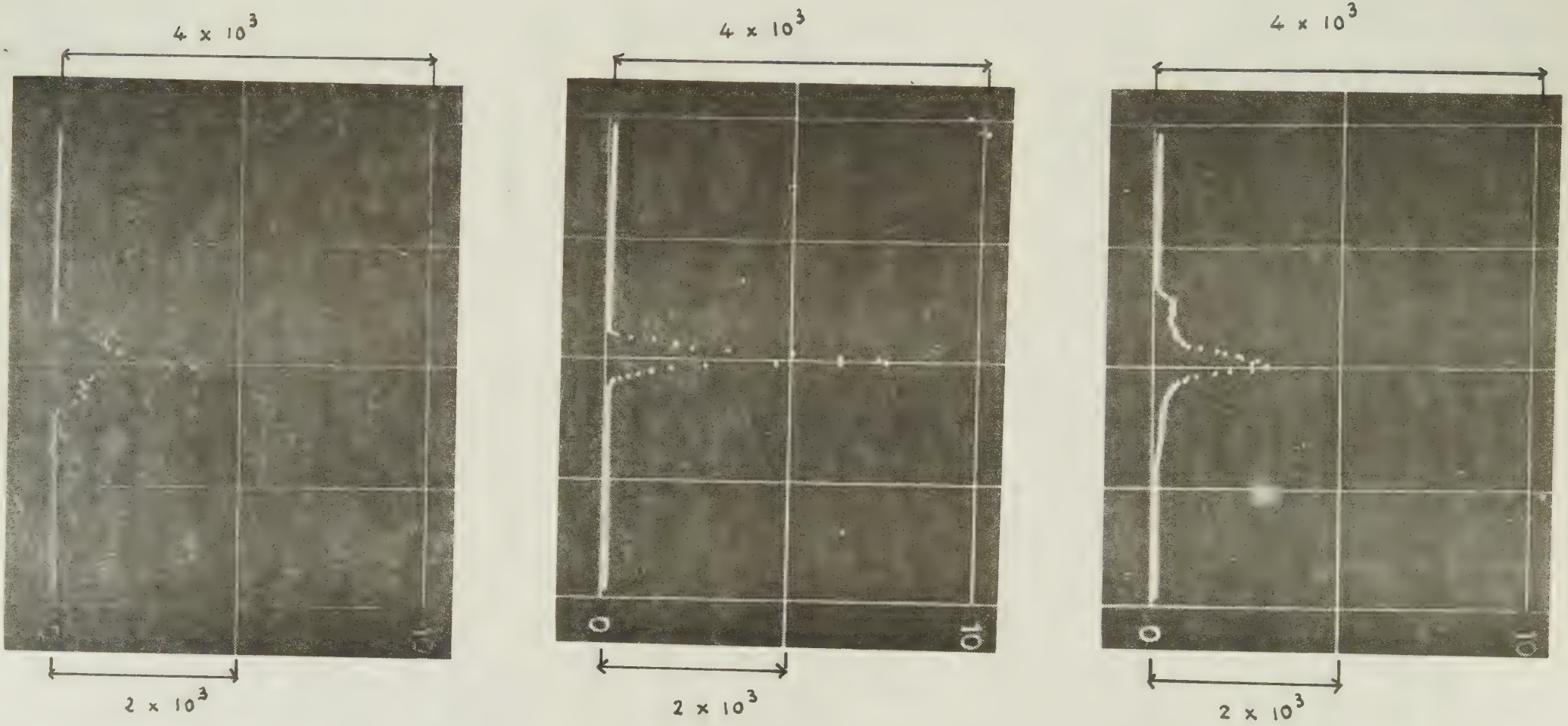
Tableau 4

.../...

Sur la planche 8 on peut voir les photographies (8, 1a, 2a, 3a) montrant les courbes de variation de l'accélération $\ddot{y}$ en fonction du temps au cours de chaque phase. En considérant ces courbes on explique la forme des histogrammes d'amplitude dont les photographies sont montrées sur la planche 9.

Variation de la force de frottement et de l'accélération dans la direction M''y en fonction du temps au cours de chaque phase

Planche 8



Histogrammes d'amplitude de l'accélération dans la direction My pendant les différentes phases

conversion 400, dimension 200, base de temps 1ms - adresse - 0 : - 1g

adresse - 199 : + 1g

Planche 9

III - 2 - 1 - b Etude de la vitesse de glissement

On peut étudier la vitesse de glissement à l'aide des courbes de la planche 8, qui représentent les variations de l'accélération tangentielle et du coefficient de frottement au cours du temps.

L'accélération $\ddot{y}$ est la dérivée seconde du déplacement du frotteur, dont la dérivée première y' représente la vitesse suivant M_y dans un repère absolu, tandis que la vitesse de glissement U s'obtient en ajoutant un terme constant.

Si on appelle J la raideur des lames de mesure lorsqu'elle fléchissent élastiquement dans la direction de la vitesse de glissement. Les coefficients de frottement statiques fs et dynamiques fd sont liés par les relations simples que voici au déplacement y [17].

$$T = J\,y \qquad T \text{ force tangentielle}$$

$$y = \frac{T}{J} = \frac{f_s P}{J}$$

$$m\,\ddot{y} - fd + Jy = 0$$

Dans cette série d'expérience P = 1 da N J = 0,73 da N

d'où y en mm = 1,33 fs

On peut par intégration graphique de $\ddot{y}$ (t) et à l'aide de y (t) tracer la courbe représentant la variation de la vitesse du frotteur au cours du temps y' (t) dans un repère M x y z lié au bâti de la machine. Il est plus facile de procéder par intégration de $\ddot{y}$ (t) que par dérivation de y (t), car l'allure de cette dernière courbe n'est pas connue avec suffisamment de précision pendant la phase de glissement.

Sur la figure 94 on peut voir les courbes obtenues dans le cas de chaque phase (94, 1.2, 2.2, 3.2).

Rappelons le processus du tracé dans le cas de la phase 1

$(t_o\ ,\ t_1)$ $\ddot{y}_1 = 0$ y' = cte y (t) est une droite

à l'instant t_2 $\ddot{y}_2$ est minima $y'_2 = 0$ y_2 est un maximum pour y

t_3 $\ddot{y}_3 = 0$ y' est maximale, la courbe y (t) présente un point d'inflexion

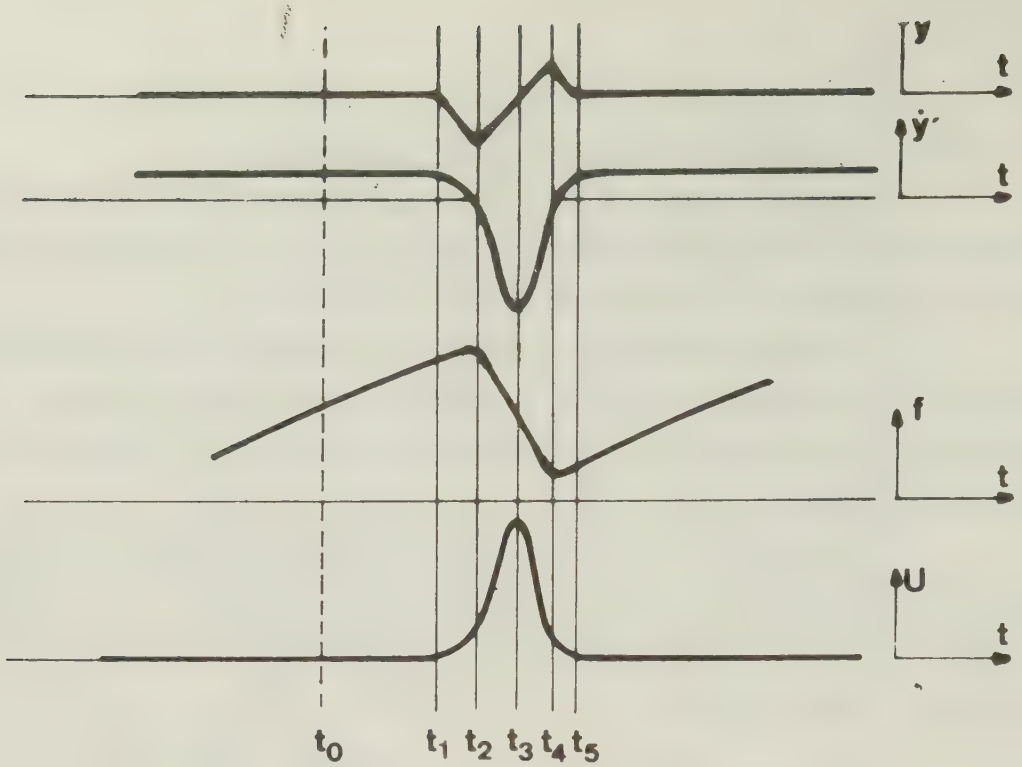
t_4 $\ddot{y}_4$ est maximale $y'_4 = 0$ y_4 est un maximun pour y

t_5 $\ddot{y}_5 = 0$ $y'_5 = cte$

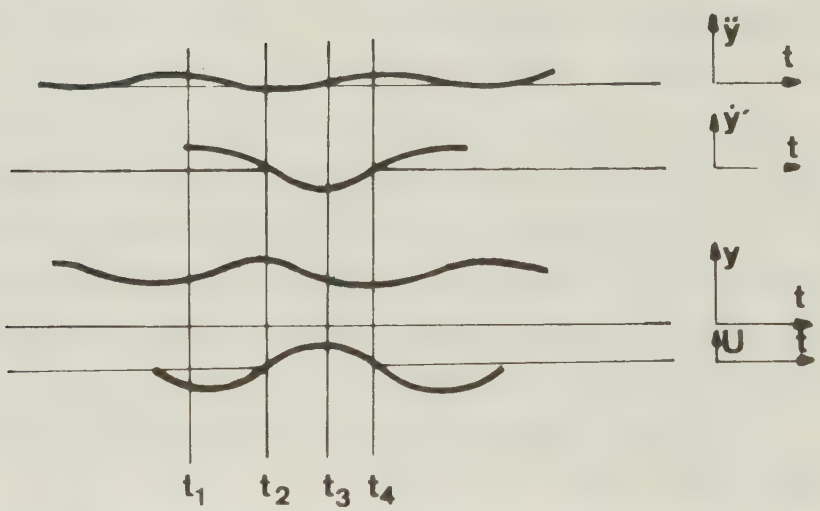
La même méthode utilisée pour le tracer de la courbe y' (t) dans le cas des phases 2 et 3.

Pour tracer les courbes U (t) qui représentent les variations de la vitesse de glissement du frotteur sur l'échantillon d'aluminium au cours du temps il faut appliquer la relation suivante :

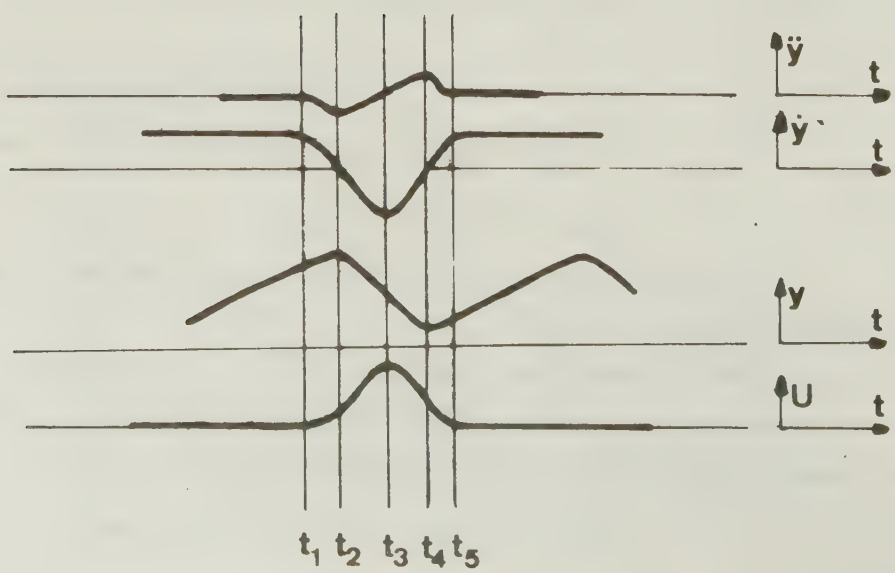
$$U = y' - U_e \qquad U_e = 4{,}07 \text{ mm/s}$$



Phase 1



Phase 2



Phase 3

fig 94

Dans le repère M"(x y z) Ue est la vitesse d'un point de l'échantillon d'aluminium soumis au frottement.

Pour préciser le tracé des courbes y'(t) et U (t), on peut calculer la vitesse du frotteur en mesurant la pente des courbes y (t) aux instants t_o et t_3. Le tableau 5 donne les résultats obtenus dans le cas de chaque phase. Les vitesses sont exprimées en mm/s.

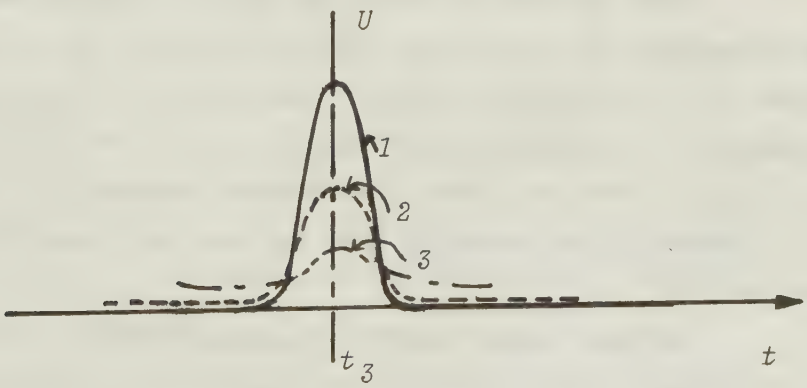
	$y'(t = t_o)$	$U(t = t_o)$	$y'_3(t = t_3)$	$U(t = t_3)$
Phase 1	4,07	0	19	23
Phase 2	2,8	1,27	2,8	6,87
Phase 3	3,7	0,37	6,5	10,6

Tableau 5

On observe pendant la première phase un collage (U = o) $t = t_o$ du frotteur en acier sur l'échantillon d'aluminium. Ce collage réapparait au cours de la troisième phase avec un peu moins de netteté. D'autra part la vitesse maximale (à $t = t_3$) est beaucoup plus forte au cours de la phase 1, ce qui correspond à l'amplitude vibratoire plus grande observée dans ce cas.

Pour souligner les différences des mouvements du frotteur au cours des différentes phases on a tracé deux réseaux de courbes.

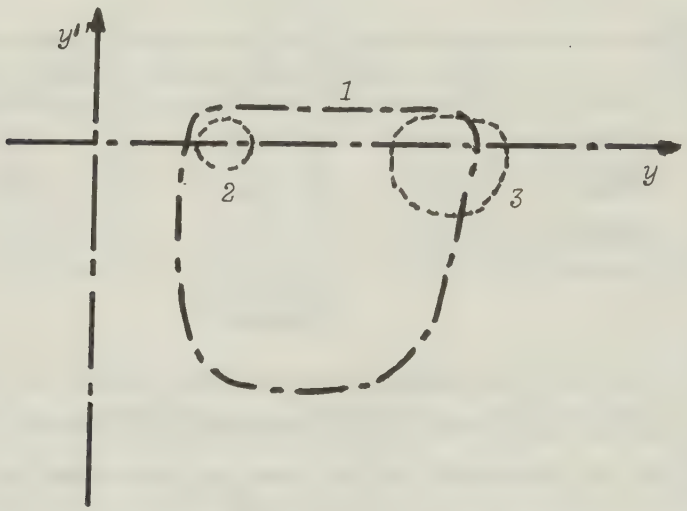
Le premier, Fig 95 montre les variations de U (t) au cours de chaque phase. On a choisi pour origine l'instant t_3 où la vitesse de glissement est maximale.



Variation de la vitesse de glissement au cours du temps - 1 phase 1
2 phase 2
3 phase 3

Fig. 95

Le second figure 96 montre l'allure des courbes obtenues dans le plan des y $\dot{y}$ dans le cas des différentes phases d'usure. Cette dernière représentation dite par les mathématiciens "dans le plan des phases" à l'avantage de donner des éléments de base pour une étude éventuelle de la stabilité relative du phénomène, par référence à des représentations types classiques



Représentation du mouvement du frotteur dans le plan $\dot{y}$, y

1 - phase 1

2 - phase 2

3 - phase 3

Fig. 96

Bien que nous n'ayons pas fait la théorie mathématique rigoureuse des phénomènes de relaxation observés (à cause de la difficulté de tenir compte de l'écrouissage évoluant continûment) on peut admettre qu'ils sont représentés en première approximation par la théorie classique du mouvement oscillatoire avec frottement de Coulomb (pendule de Froude par exemple). Les représentations obtenues dans le plan des phases ne contredisent pas ce point de vue.

Or dans cette théorie classique [173-174] on aboutit à deux conclusions

1 - On obtient des vibrations pour des vitesses d'entrainement Ue variant entre zéro et une valeur critique.

2 - On obtient des vibrations que lorsque la discontinuité fs - fd est supérieure à une certaine valeur critique.

.../...

Nous avons vérifié :	fs	fd	fs - fd
Phase 1	0,28	0,14	0,14
Phase 2	0,11	0,11	0
Phase 3	0,34	0,25	0,09

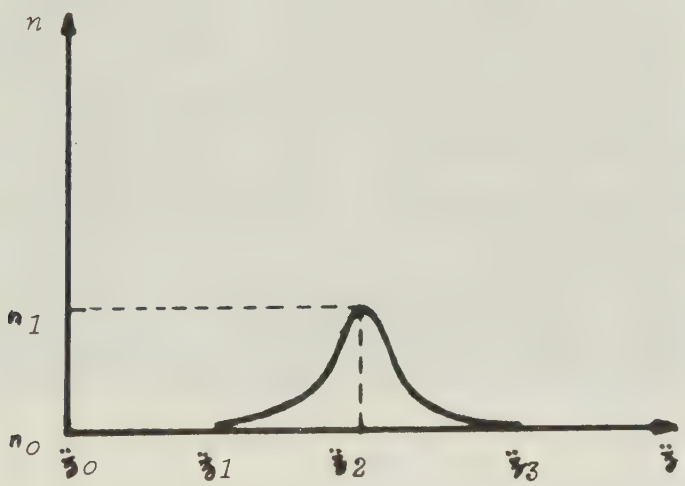
L'étude de la vitesse critique dans notre cas serait compliquée par deux phénomènes :

1°) Intervention de plus en plus forte de l'hydrodynamique quand la vitesse augmente car le glissement s'effectue en présence d'un lubrifiant.

2°) Risque d'échauffement des surfaces se traduisant par des oxydations donc par un changement de la nature des surfaces frottantes dans le cas du frottement sec.

III - 2 - 2 Accélération $\ddot{y}$ (Suivant la direction perpendiculaire à la surface de l'échantillon d'aluminium)

La figure 97 montre l'allure de l'histogramme d'amplitude



Histogramme d'amplitude de l'accélération du frotteur dans la direction perpendiculaire à la surface de l'échantillon d'aluminium.

Fig. 97

.../...

Le tableau 6 donne les coordonnées des points les plus caractéristiques des histogrammes obtenus au cours de chaque phase.

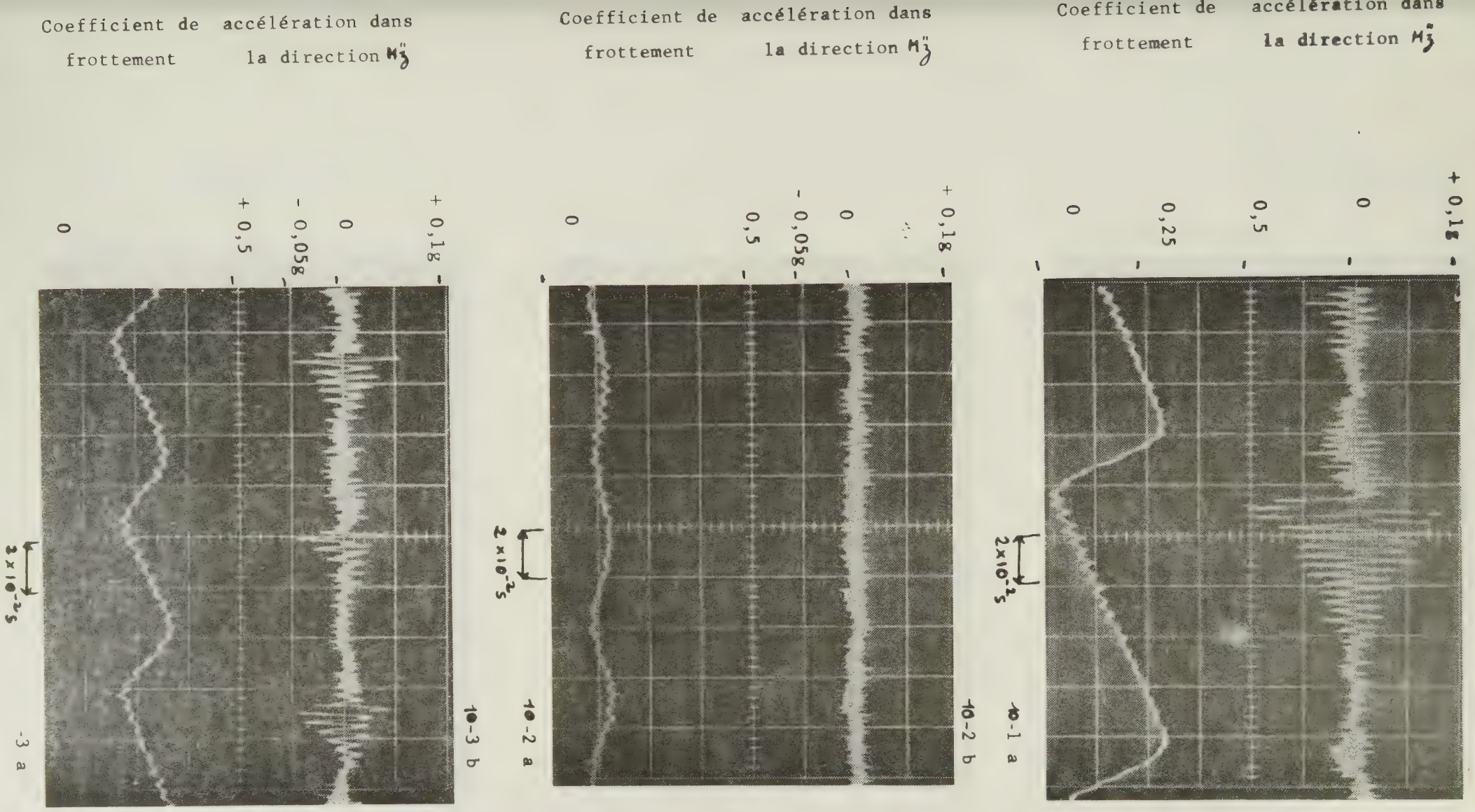
	Phase 1		Phase 2		Phase 3	
	$\ddot{\gamma}$	Nombre de caractères	$\ddot{\gamma}$	Nombre de caractères	$\ddot{\gamma}$	Nombre de caractères
$\ddot{\gamma}_1$, n_o	- 0,1 g	7	- 0,001g	6	- 0,05g	1
$\ddot{\gamma}_2$, n_1	+ 0,001g	723	- 0,001g	1690	+ 0,004g	1170
$\ddot{\gamma}_3$, n_o	+ 0,1 g	13	+ 0,025g	1	+ 0,06g	7

Coordonnées des points caractéristiques des histogrammes d'amplitude de l'accélération du frotteur dans la direction perpendiculaire à la surface de l'échantillon d'aluminium.

Tableau 6

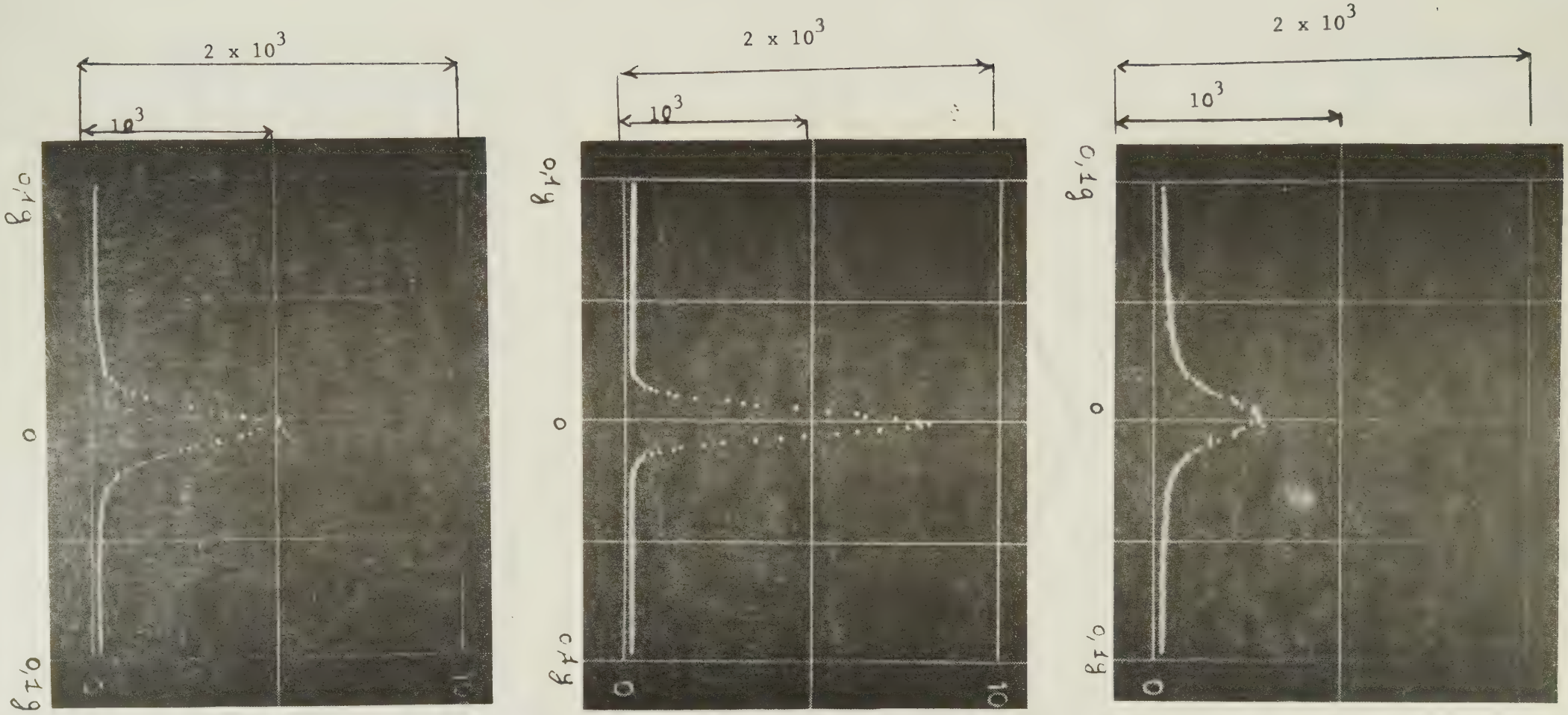
Sur la planche 10 on peut observer les photographies (10, 1b, 2b, 3b) des courbes montrant la variation de l'accélération $\ddot{\gamma}$ en fonction du temps au cours de chaque phase. Ces courbes correspondent à des phénomènes périodiques auxquels sont superposés des bruits, ce qui explique l'allure des histogrammes d'amplitude dont on peut voir la photographie sur la planche 11. Nous reviendrons au paragraphe IV sur les interprétations, en les comparant aux signaux x et $\ddot{y}$ et $\ddot{x}$

.../...



Variation de la force de frottement et de l'accélération dans la direction $\ddot{M}_j$ en fonction du temps au cours de chaque phase

Planche 10



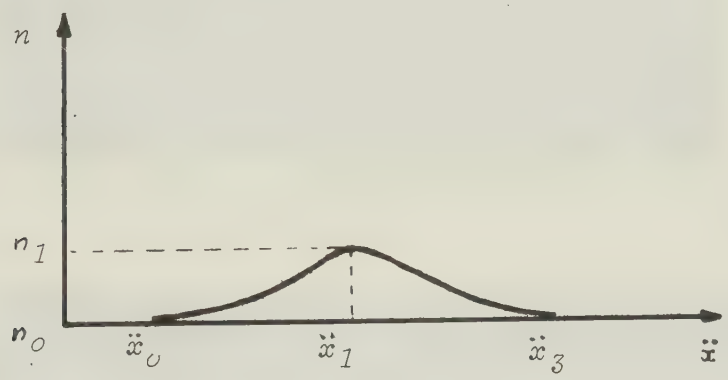
Histogramme d'amplitude de l'accélération dans la direction Mz pendant les différentes phases

conversion 400, dimension 200, base de temps 1ms, adresse 0 : - 0,1g - adresse 199 : + 0,1g

Planche 11

III - 2 - 3 Accélération $\ddot{x}$ (dans la direction perpendiculaire à celles du glissement et de la surface de l'échantillon d'aluminium)

La figure 98 montre l'allure de l'histogramme d'amplitude



Histogramme d'amplitude de l'accélération du frotteur dans la direction perpendiculaire à celles du glissement et de la surface de l'échantillon d'aluminium.

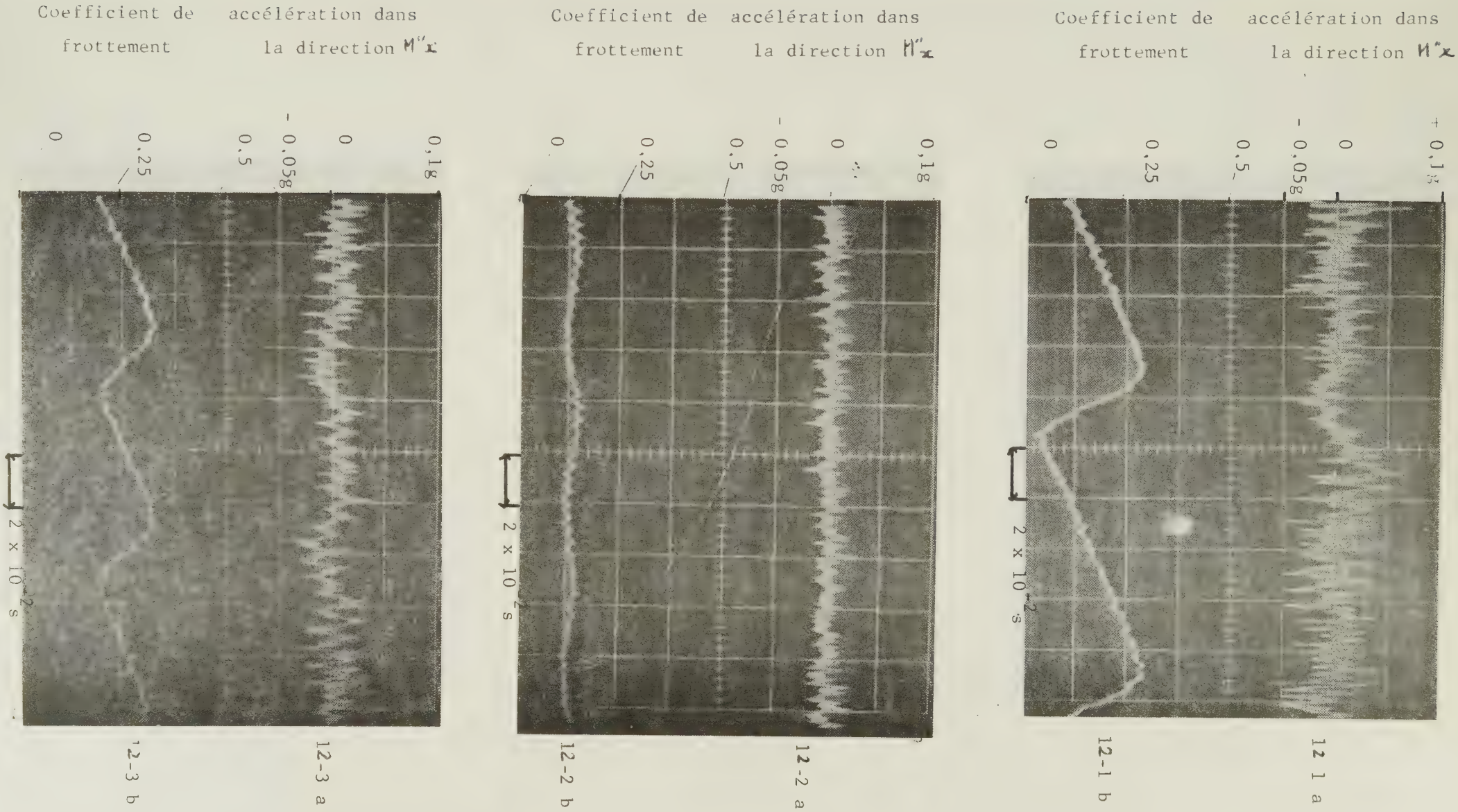
Fig. 98

Le tableau 8 donne les coordonnées des points les plus caractéristiques des histogrammes obtenus au cours de chaque phase.

Points	Phase 1		Phase 2		Phase 3	
	$\ddot{x}$ g	Nombre de caractères	$\ddot{x}$ g	Nombre de caractères	$\ddot{x}$ g	Nombre de caractères
$\ddot{x}_1$, n_o	-0,097	17	-0,037	1	-0,050g	1
$\ddot{x}_2$, n_1	-0,006	451	-0,003	778	0	778
$\ddot{x}_3$, n_o	+0,100	3	+0,032	5	+0,046g	5

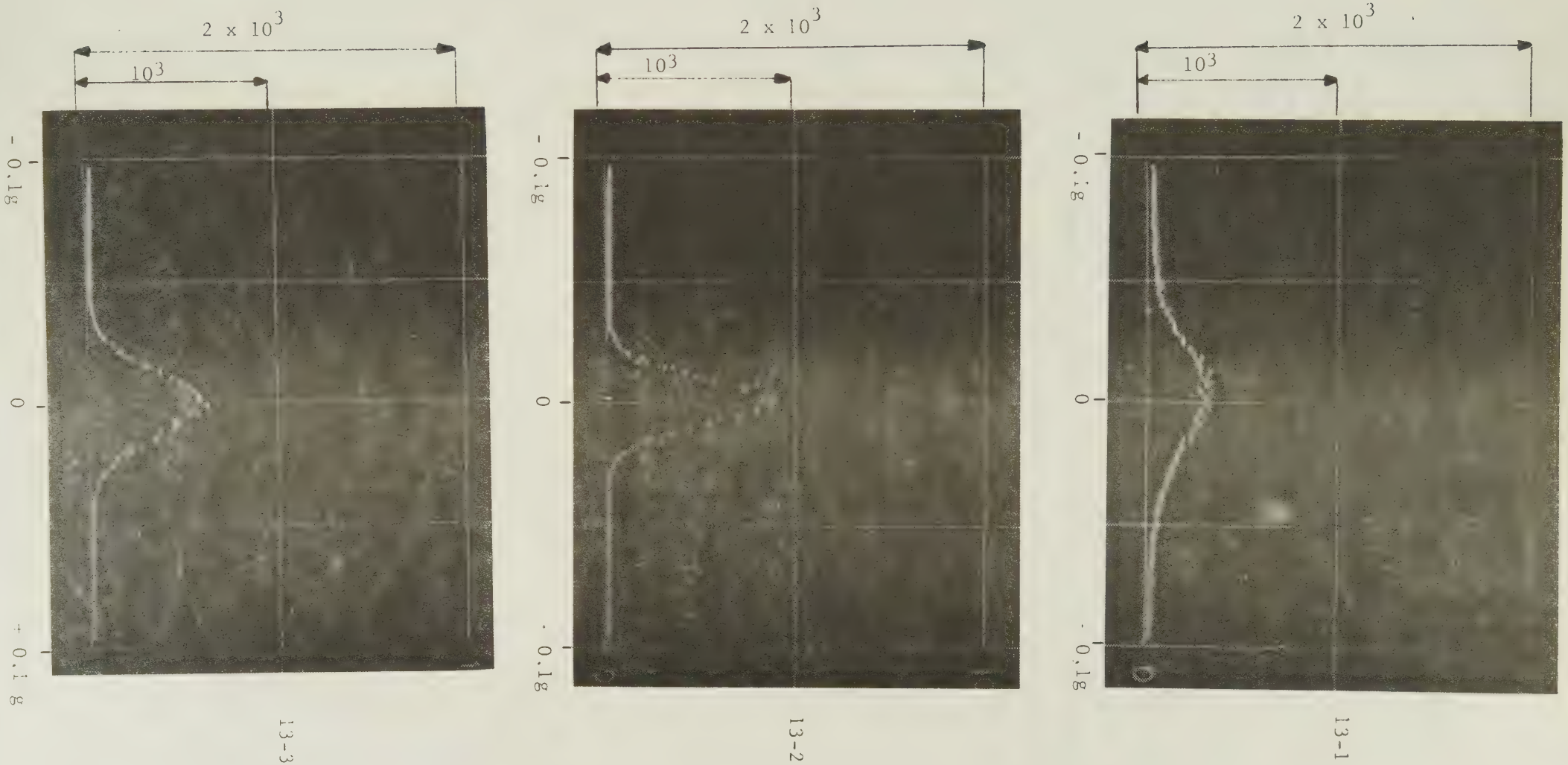
Coordonnées des points caractéristiques des histogrammes d'amplitude de l'accélération du frotteur dans la direction perpendiculaire à celles du glissement et de la surface de l'échantillon d'aluminium.

Tableau 8



Variation de la force de frottement et de l'accélération dans la direction M"x en fonction du temps au cours de chaque phase

Planche 12



Histogramme d'amplitude de l'accélération dans la direction M"x pendant les différentes phases

conversion 400, dimension 200, base de temps 1m.s, étalonnage

adresse - 0 : - 0,1 g
adresse - 100 : - 0
adresse - 199 : : 0,1 g

Planche 13

Sur la planche 12 on peut observer les photographies (12, 1a, 2a 3a) des courbes montrant la variation de l'accélération $\ddot{x}$ en fonction du temps au cours de chaque phase. Ces courbes ressemblent à celles formées par des phénomènes périodiques auxquels sont superposés des bruits, ce qui explique l'allure des histogrammes d'amplitude dont on peut voir la photographie sur la planche 13.

Au cours de chaque phase les histogrammes d'amplitude des accélérations du frotteur dans les directions ; $\ddot{M}_y$, $\ddot{M}_z$, $\ddot{M}_x$ sont différents. Les accélérations dans la direction $\ddot{M}_y$ s'expliquent par la déformation des lames de mesure sous l'effet de la force de frottement. On observe l'existence d'accélérations, d'amplitudes faibles dans la direction $\ddot{M}_z$ normale à la surface de l'échantillon d'aluminium, et dans la direction $\ddot{M}_x$ perpendiculaire aux deux précédentes. Nous étudierons plus en détail ces points dans le paragraphe IV ci-après.

.../...

IV - ETUDE DETAILLEE DE LA FORCE DE FROTTEMENT ET DES ACCELERATIONS DU PORTE-FROTTEUR AU COURS DES HUIT PREMIERES ROTATIONS DE L'ECHANTILLON D'ALUMINIUM.

On a vu que les courbes types $\ddot{y}$ (t) et $\ddot{x}$ (t) obtenues au cours de chaque phase ressemblent à celles fournies par des phénomènes périodiques auxquels seraient superposés des bruits. Afin de préciser l'allure de ces courbes on utilise les résultats d'une expérience effectuée dans des conditions identiques à la précédente mais où l'on a analysé en détail chaque tour. Dans ce but on a enregistré sur bande magnétique les tensions électriques représentant le coefficient de frottement et les accélérations $\ddot{x}$ $\ddot{y}$ $\ddot{z}$ du frotteur pendant les 8 premières rotations de l'échantillon d'aluminium. c'est-à-dire pendant les première et seconde phases.

IV - 1 Etude de f, $\ddot{y}$, $\ddot{x}$, $\ddot{z}$ au cours des 8 premières rotations de l'échantillon d'aluminium.

La planche 14 montre les photographies des histogrammes d'amplitude du coefficient de frottement. Ces courbes sont obtenues en analysant la force de frottement pendant 76 secondes, c'est-à-dire pendant une durée inférieure à celle qui est nécessaire à l'échantillon d'aluminium pour faire un tour complet. L'analyse est déclenchée dès le début de chaque rotation. On observe que les histogrammes d'amplitude ont la même allure qu'au cours de l'expérience précédente. Après la première rotation la base de la courbe se rétrécit et son sommet s'élève. Les phases 1 et 2 décrites dans les paragraphes précédents sont très nettes.

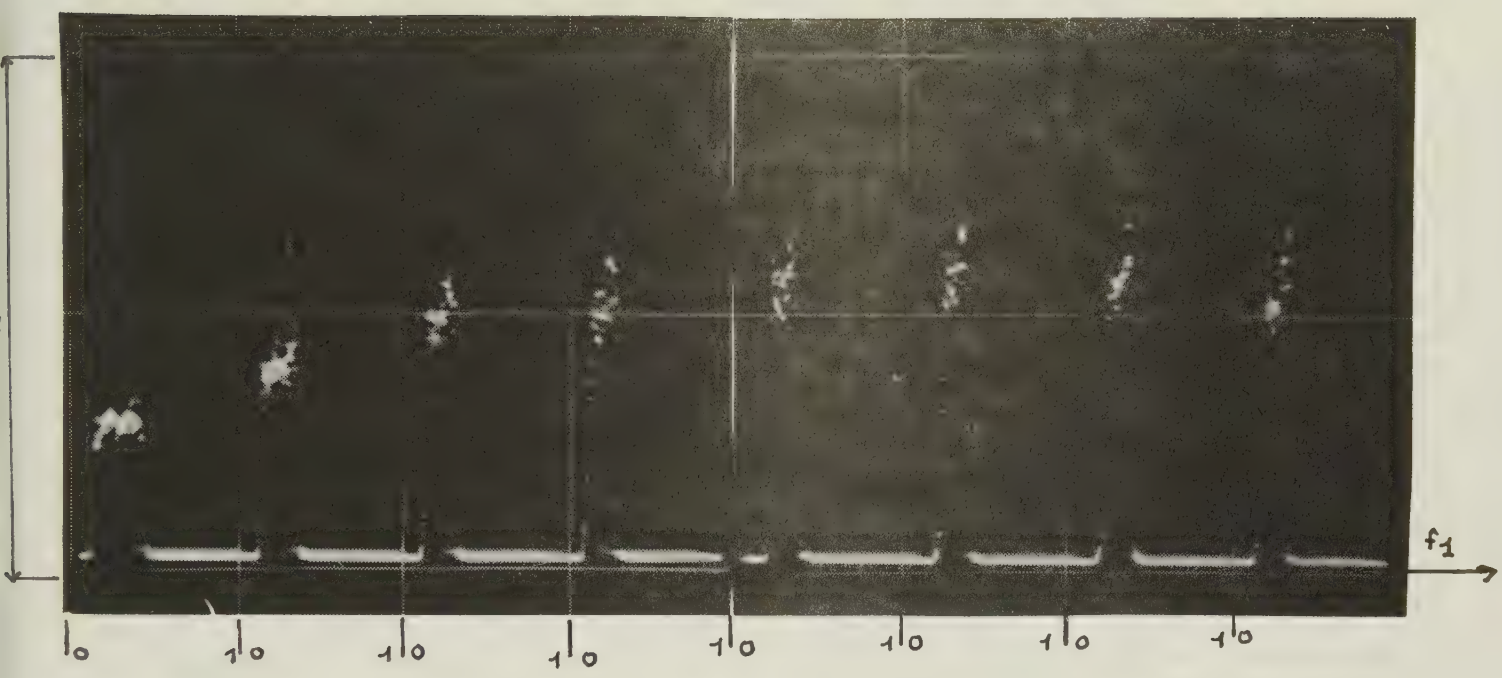
Les coordonnées des points caractéristiques de l'histogramme d'amplitude du coefficient de frottement sont données dans le tableau 9.

Coor. \ N	f	Nbre de carac	f	Nbre de carac	f	Nbre de carac	f	Nbre de carac	f	Nbre de carac	f	Nbre de carac	f	Nbre de carac	f	Nbre de carac
f_1, n_o	0,055	11	0,06	1	0,08	2	0,1	2	0,125	2	0,15	2	0,155	1	0,15	3
f_1, n_1	0,11	314	0,125	437	0,14	557	0,17	573	0,19	622	0,23	623	0,25	626	0,22	605
f_3, n_2	0,315	341	0,295	500	0,275	600	0,295	644	0,3	657	0,35	651	0,355	670	0,35	711
f_4, n_o	0,405	5	0,350	4	0,35	7	0,365	3	0,38	5	0,4	4	0,450	6	0,4	8

Coor. = Coordonnées des points caractéristiques de l'histogramme
N = Rotations de l'échantillon d'aluminium
Nbre de carac. = Nombre de caractères

Tableau 9

.../...



Evolution de l'histogramme d'amplitude de la force de frottement au cours des 8 premières rotations de l'échantillon d'aluminium

Planche 14

Sur la planche 15 on peut voir des photographies des courbes obtenues à l'aide de l'oscillographe à mémoire. On peut reconnaitre la composante périodique de $\ddot{y}$ (t) et de $\ddot{x}$(t). Les principales grandeurs caractérisant la composante périodique $\ddot{y}$ (t), $\ddot{z}$ (t) et $\ddot{x}$ (t) sont représentées schématiquement sur la figure 99-1. Le tableau 10 donne les résultats des mesures effectuées à partir de photographies obtenues à l'aide de l'oscillographe à mémoire.

Grandeurs caractéristiques des accélérations		rotations	1	2	3	4	5	6	7	8
$\ddot{y}$	Amplitude en g	Y_1	1	0,3	0,22	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		Y'_1	1,30	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		$Y_1 + Y'_1$	2,3	0,6	0,42	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	en ms	T_1^Y	31	31	35	37	35	35	35	33
		T_o^Y	124	111	89	92	86	84	81	83
$\ddot{z}$	Amplitude en g	Z_1	0,028	0,022	0,019	0,017	0,017	0,019	0,022	0,022
	en ms	T_o^Z	121	113	91	88	88	76	82	89
$\ddot{x}$	Amplitude en g	X_1	0,03	0,03	0,028	0,026	0,03	0,026	0,03	0,03
	en ms	T_o^X	124	110	91	91	91	85	80	95

Tableau 10

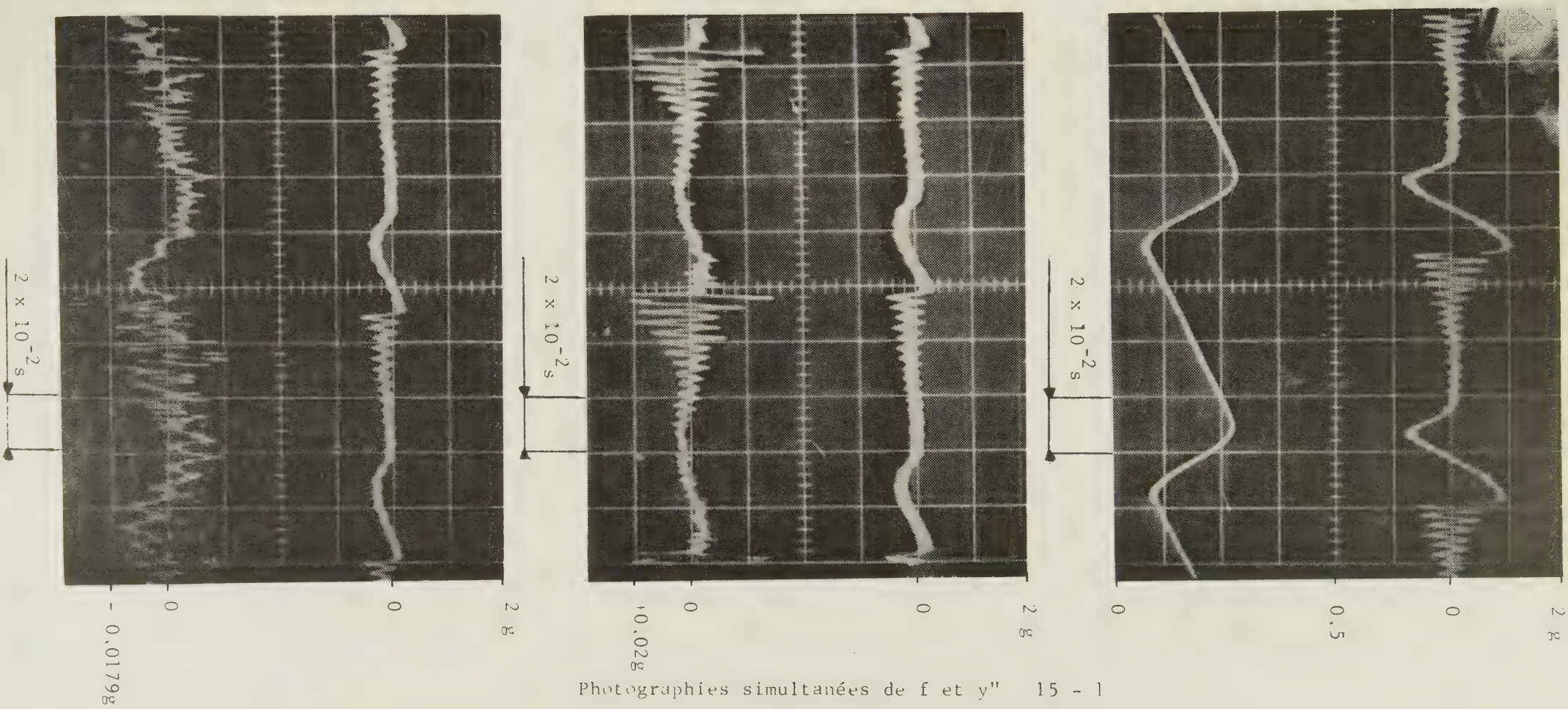
La lecture de ce tableau montre que l'amplitude maximale de l'accélération $\ddot{y}$ est divisée par 4 dès que l'échantillon d'aluminium commence sa deuxième rotation ce qui montre que l'importance de la transformation de la surface de l'échantillon d'aluminium au cours du premier passage.

L'amplitude de $\ddot{z}$ diminue de 30 % environ quand l'échantillon d'aluminium commence sa deuxième rotation, elle varie très peu par la suite.

L'amplitude de $\ddot{x}$ garde pratiquement la même valeur au cours des 8 rotations.

Les amplitudes de $\ddot{x}$ et de $\ddot{z}$, très faibles sont du même ordre de grandeur, l'amplitude de $\ddot{y}$ leur est environ 70 fois supérieure au cours du premier tour, et 20 fois environ par la suite.

La loi de direction $\vec{T} \times \vec{U} = 0$, exprimant que la force de frottement et la vitesse de glissement ont même direction, est donc vérifiée avec une bonne approximation dans le cas de nos expériences.

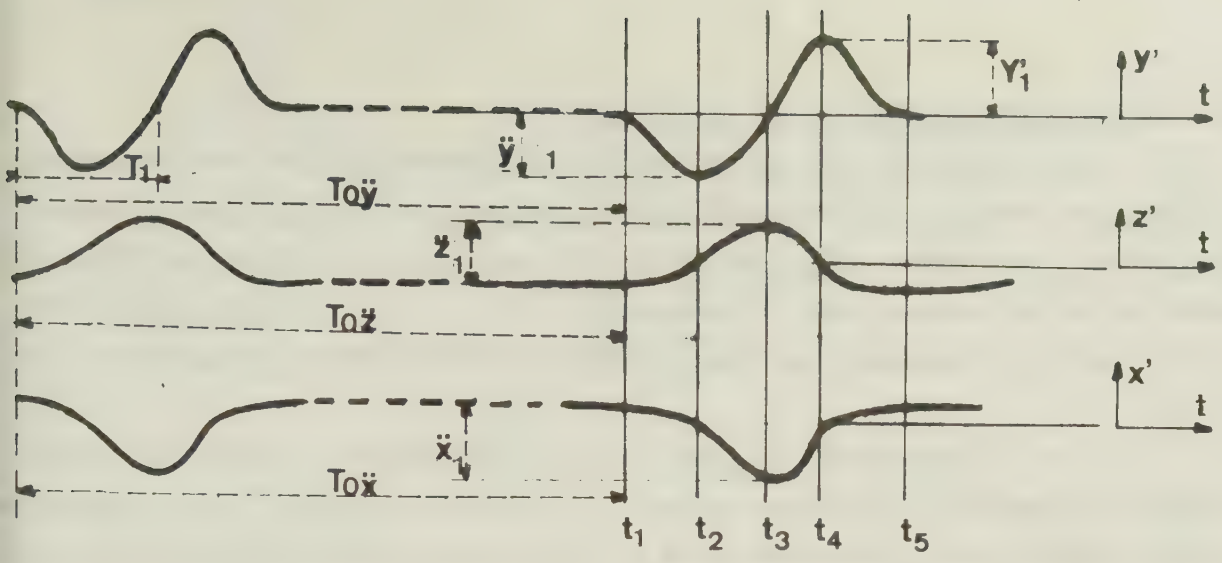


Photographies simultanées de f et y" 15 - 1

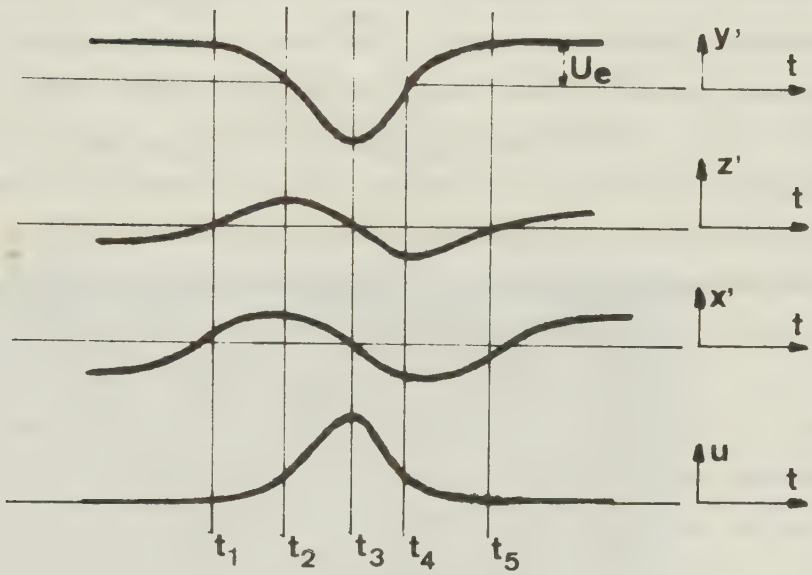
y" et z" 15 - 2

z" et x" 15 - 3

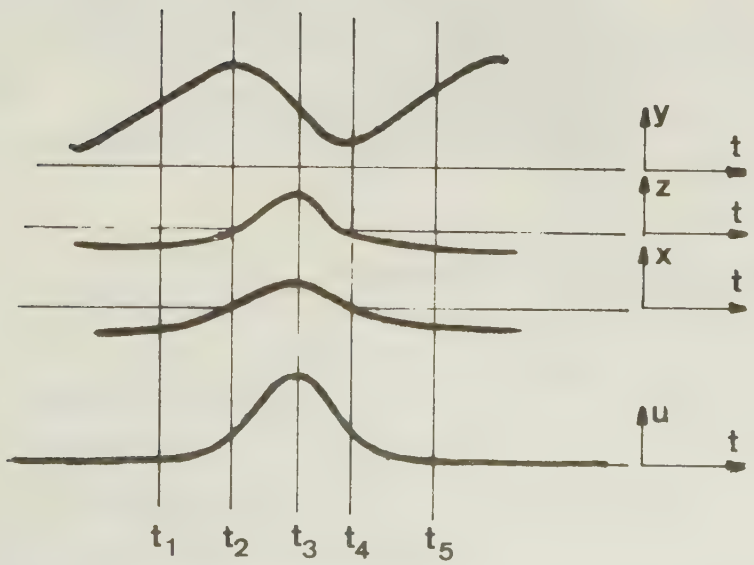
Planche 15



accélérations 99-1



vitesses 99-2



déplacements 99-3

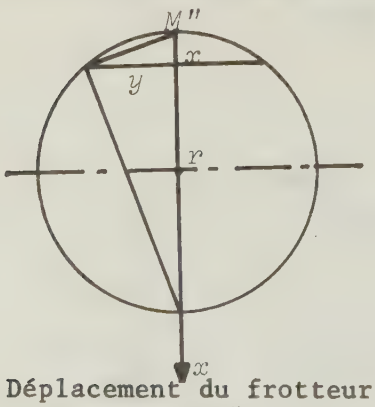
Fig 99

IV - 2 Etude des courbes x (t) et z (t)

Les quantités $\ddot{z}$ et $\ddot{x}$ sont les dérivées secondes des déplacements du frotteur dans les directions M'_z et M''_x. On peut par intégrations successives tracer les courbes z' (t) x' (t), z (t) et x (t). La méthode utilisée est celle qui a été exposée dans le paragraphe III - 2 - 1 - b pour l'étude de la vitesse de glissement. Les figures 99-2 et 99-3 montrent les courbes obtenues.

Sur la planche 16 on peut voir une photographie illustrant le phénomène de remontée du frotteur pendant le glissement saccadé. Elle représente vue du dessus une partie d'une trace de frottement effectuée à l'aide du tribomètre alternatif. Au cours de la phase 1 après le premier passage du frotteur. Les conditions initiales sont données sur la planche. L'examen du bord de la trace montre que le frotteur se déplace verticalement au cours du mouvement saccadé. Pendant la phase de collage le frotteur s'enfonce dans la plaquette d'aluminium, puis quand la force d'entrainement devient suffisante il glisse, en s'élevant, sur cette surface oxydée dont le métal sous-jacent a été durci par écrouissage (bourrelet frontal). Quand il retrouve une zone plus molle il s'enfonce de nouveau. L'écrouissage en avant du frotteur a été mis en évidence par la méthode de recristallisation planche 22. Le phénomène est périodique. La période correspond à la distance entre les signes sombres fléchés visibles sur la planche 16.

Le déplacement du frotteur dans la direction M''_x peut s'interpréter par le collage du frotteur sur l'échantillon d'aluminium. Le point de contact se déplace sur un cercle. On peut calculer l'ordre de grandeur de la projection de ce déplacement sur la direction M"x. Le croquis de la figure 100 montre le principe du calcul.



Déplacement du frotteur dans la direction M''_x

$y^2 \simeq 2\,rx$

$2\,r = 100$ mm

$y \simeq 0{,}5$ mm

On trouve $x \simeq 2{,}5$ µm

Fig. 100

.../...

On peut calculer l'ordre de grandeur du déplacement dans la direction M_z, normale à la surface de l'échantillon d'aluminium, en supposant que le mouvement entre les instants t_1 et t_5 Fig. (99) est une fonction sinusoïdale du temps.

On écrit : $z = zo \sin(\omega t + \delta)$

$\ddot{z} = \omega zo \cos(\omega t + \delta)$

$\ddot{z} = -\omega^2 zo \sin(\omega t + \delta)$

$z''_o \simeq 0{,}03\ g$

$\omega = \frac{2\pi}{T_o^z}$ $\quad \frac{T_o^z}{4} = 20$ ms $\quad T_o^z = 80$ ms

z mm $\simeq 5\ \mu$m

déplacement de la plaquette

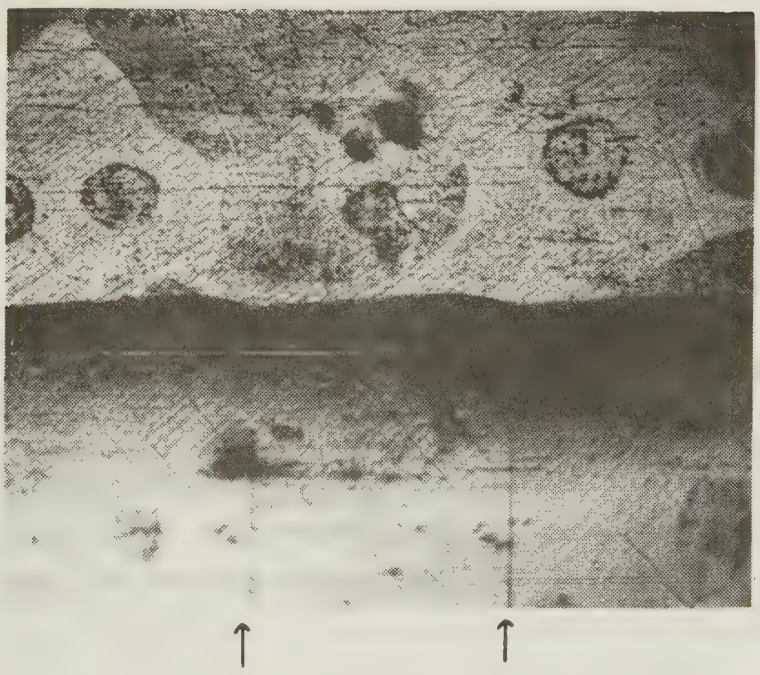


Planche 16

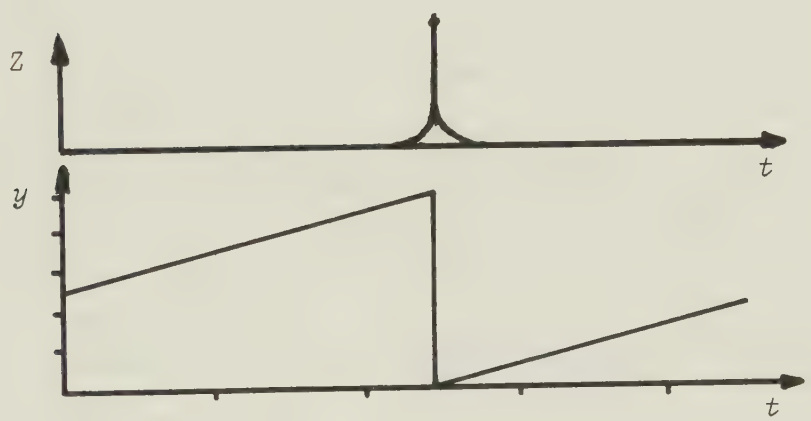
Conditions initiales du frottement

- Mode de contact : bille Ø 5 mm
- Ambiance : huile de vaseline
- Charge 4, 16 da N
- Vitesse de glissement 1 mm/mn
- Le frotteur est en acier à roulement
- L'échantillon d'aluminium de nuance A 99, a été recuit 30 h à 600° C

Si on compare, pendant une période du mouvement saccadé, les ordres de grandeur des amplitudes du déplacement du frotteur dans les trois directions M''_y, M''_z, M''_x il vient :

$$y = 500\ \mu m$$
$$z = 5\ \mu m$$
$$x = 2{,}5\ \mu m$$

Nos études confirment et précisent les résultats obtenus par TOLSTOI [27]. En effet cet auteur avait mesuré les déplacements normaux aux surfaces et avait observé qu'il y avait une remontée des pièces en contact lors de la phase de glissement. La figure 101 rappelle l'un des principaux résultats de mesure. Dans notre étude, la phase t_1, t_5 est plus détaillée.



Remontée du frotteur pendant le glissement saccadé, d'après TOLSTOI

Fig. 101

et, à partir des mesures d'accélération dans les directions M''_y et M''_z nous montrons que cette remontée maximale a lieu quand la vitesse de glissement U est maximale c'est-à-dire au milieu de la branche y_2, y_4. Notons que dans nos expériences l'amplitude du déplacement dans la direction normale aux surfaces est 100 fois plus petite que l'amplitude du déplacement dans la direction de la vitesse de glissement, comme chez TOLSTOI.

.../...

On peut noter en passant que ce problème des vibrations entretenues par le frottement qui est extrêmement important n'a jamais été étudié complètement. Dans notre esprit et suivant toujours en cela aussi bien TOLSTOI [21] que COURTEL [22], l'existence de vibrations tangentielles est inséparable de celle de vibrations normales simultanées pendant la phase de glissement, avec lesquelles elles sont couplées par un mode physique à préciser.

Nous pensons que les accélérations du frotteur et le glissement saccadé traduisent les modifications et endommagements des surfaces en contact. L'objet des paragraphes suivants est d'approfondir ce point de vue.

V - ETUDE DES SURFACES DES ECHANTILLONS D'ALUMINIUM

Afin de connaître les transformations et endommagements subis par l'échantillon d'aluminium au cours des trois phases, les surfaces ont été étudiées dans l'état qui est le leur à la fin des deux premières phases et au cours de la troisième. On a utilisé trois échantillons d'aluminium. Les conditions initiales étant celles indiquées au début de ce chapitre, le premier échantillon a fait 3/4 de tour, le second 4 tours, le troisième 274 tours. Ces rotations correspondent aux trois phases visibles sur la figure 90.

La simple observation visuelle, ou à la loupe binoculaire montre que pendant les phases 1 et 2, la surface conserve sensiblement le même aspect et parait simplement plus lisse que dans son état original, en phase trois la surface parait rugueuse et brillante montrant ainsi la disparition du film d'oxyde. L'huile de vaseline qui est claire au début de l'expérience, devient noirâtre car elle se charge de particules d'usure. Ces observations vont être confirmées et précisées par les différentes méthodes d'analyses utilisées : Répliques par vernis polymérisable à froid, profilométrie électro-mécanique, micrographie électronique, mesure de la résistance de contact, microdureté, recristallisation.

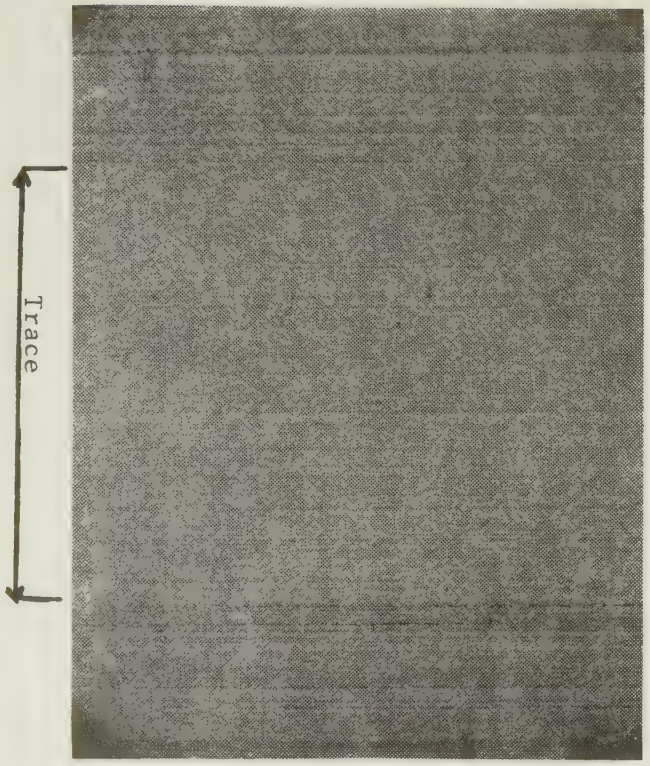
V - 1 Répliques par vernis polymérisable à froid

La méthode utilisée est celle de Jacquet [174 bis]. Un produit pâteux est répandu sur la surface étudiée. Lorsqu'il est solidifié par polymérisation à froid, en le retirant on obtient un négatif de la surface. Cette réplique est examinée au microscope métallographique par contraste interférentiel Nomarski [175].

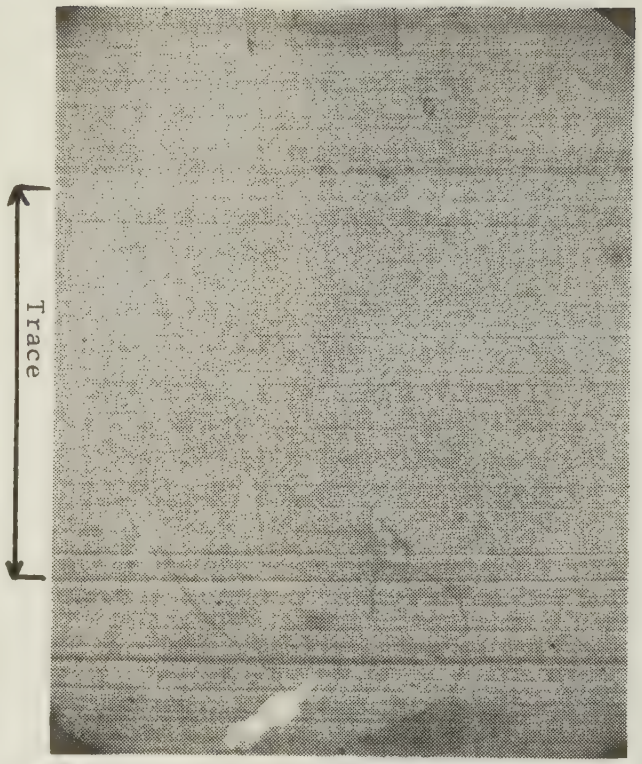
Sur la planche 17 on peut voir les photographies obtenues à partir des répliques.

Sur la photographies 17-0, on voit les stries de tournage qui existent sur la surface de l'échantillon d'aluminium avant frottement. En phase 1 (photo 17-1) ces stries d'usinage sont encore visibles mais la surface d'aluminium parait plus lisse dans la trace de frottement. En phase 2 (photo 17-2) la trace s'est élargie et le lissage de la surface s'est accentuée. En phase 3 on observe des rayures et des arrachements importants au sein de la trace qui s'est encore élargie (photo 17-3)

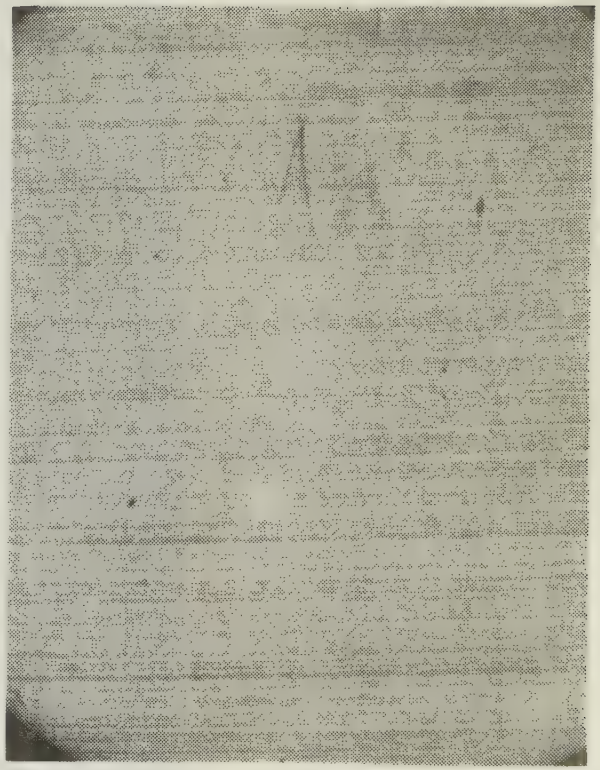
.../...



17-2



17-1



17-0 x 100

Photographies obtenues à partir de répliques par vernis Jacquet de l'échantillon d'aluminium avant frottement au cours des phases 1, 2, 3

Planche 17

Réplique par vernis Jacquet de la surface d'aluminium au cours

de la 3ème phase

V - 2 Profilogrammes

Le profilomètre utilisé, connu sous le nom de "Talysurf"[176] permet d'obtenir, dans la direction perpendiculaire à celle de la vitesse de glissement, le profil de la trace produite par le frotteur sur l'échantillon d'aluminium. Sur la planche 18 on peut voir les photographies des profilogrammes obtenus au cours de chaque phase.

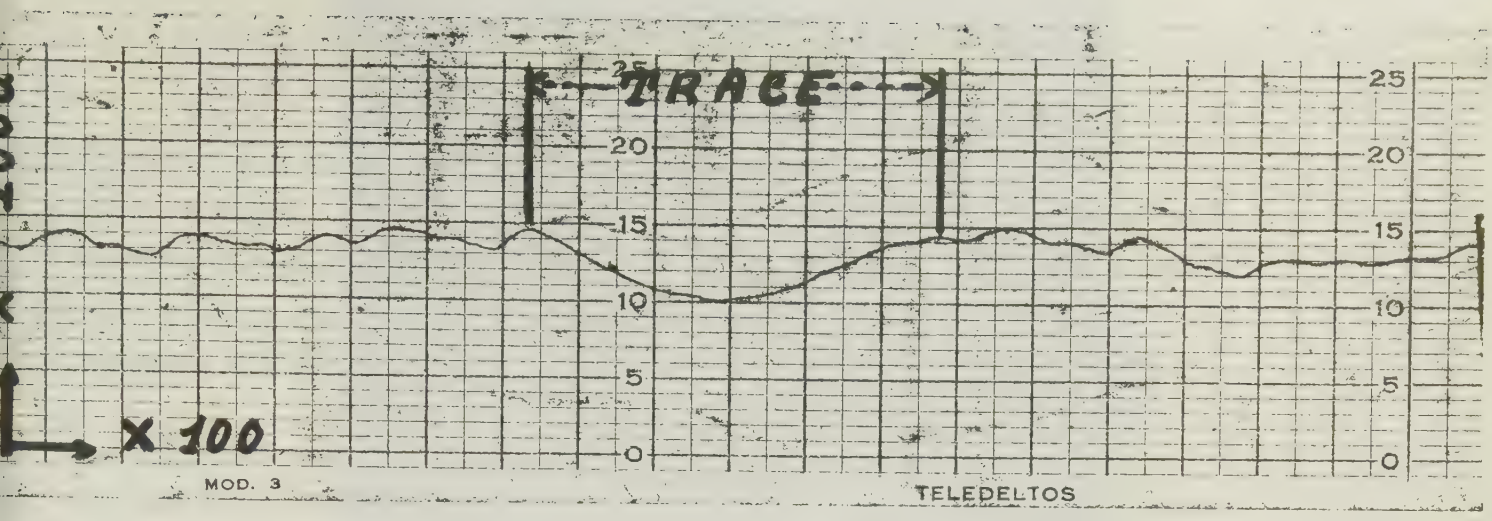
Pendant la première phase (photo 18-1) le fond de la trace est lisse, les aspérités qui existent initialement sur la surface de l'échantillon ne sont plus visibles et paraissent écrasées.

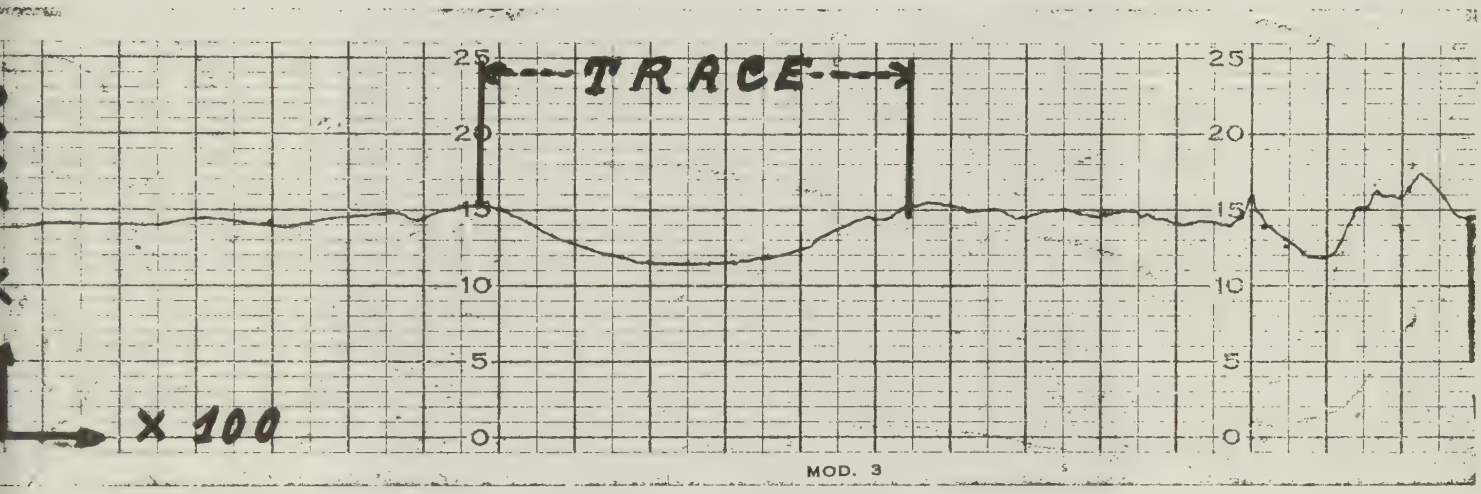
Pendant la deuxième phase (photo 18-2) la trace qui s'élargit conserve un fond lisse et ses bords surélevés par rapport à leur niveau originel.

Au cours de la troisième phase (photo 18-3) le fond de la trace présente des rayures profondes correspondant à des destructions des couches superficielles par arrachements.

Rappelons que s'il n'y a pas d'huile ni d'oxyde on tombe aussitôt en phase 3.

Ces profilogrammes complètent donc les observations effectuées à partir des répliques par vernis polymérisable à froid.


TRACE
25
20
15
10
5
0
X 100
MOD. 3
TELEDELTOS


TRACE
25
20
15
10
5
0
X 100
MOD. 3

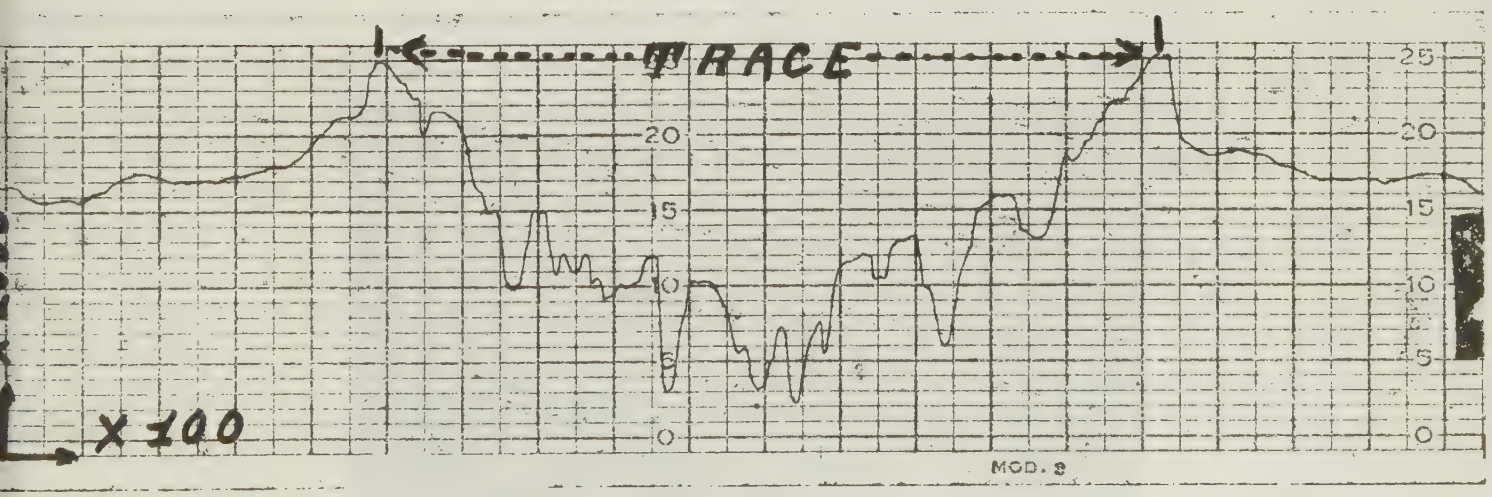

TRACE
25
20
15
10
5
0
X 100
MOD. 3

Planche 18

V - 3 Micrographies électroniques

On a utilisé la technique des répliques au carbone-platine [177]. On dépose sur la surface de l'échantillon une couche de carbone et de platine. L'aluminium est dissout par voie électrolytique en plaçant l'échantillon, relié à l'anode, dans un bain Jacquet. La réplique obtenue qui est une couche d'alumine recouverte de carbone et de platine est examinée par transmission au microscope électronique.

La planche 19 montre les photographies, à différents grossissements, des répliques prises dans un endroit de la surface non soumis au frottement. Les stries d'usinage apparaissent sous forme de bandes sombres parallèles. Les plages claires correspondent à de l'aluminium amorphe et les taches sombres de formes géométriques à des grains d'aluminium cristallisée [178].

Au cours de la première phase (photo 20-1-a et 20-1-b) il y a déformation des stries d'usinage et apparition d'une dernière série de lignes sombres faisant un certain angle avec les stries d'usinage. Ces lignes correspondent à des fissures de la couche d'alumine et partent des grains d'alumine cristallisée qui jouent le rôle de point d'ancrage de la couche d'alumine. .

Pendant la deuxième phase on observe (photo 20-2) des arrachements de la couche d'alumine. Les zones détruites ont une aire dont l'ordre de grandeur est de $0,01 \mu m^2$.

Au cours de la troisième phase on observe sur les répliques (planche 21) des zones présentant des rayures et des arrachements.

La micrographie électronique précise et complète les résultats obtenus par les méthodes précédentes en indiquant que dès le début du glissement il y a détérioration de la couche superficielle. Elle nous renseigne aussi sur la nature de cette couche en montrant que l'alumine y est partiellement cristallisée, et que les grains correspondants jouent un role privilégié dans la résistance à l'endommagement.

.../...

19 a

x 3200

19 b

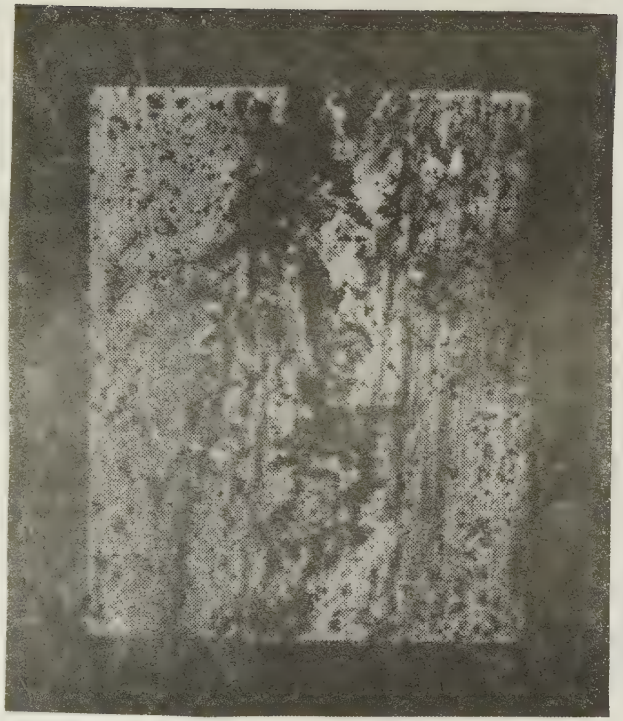
x 9000

19 c

x 23.000

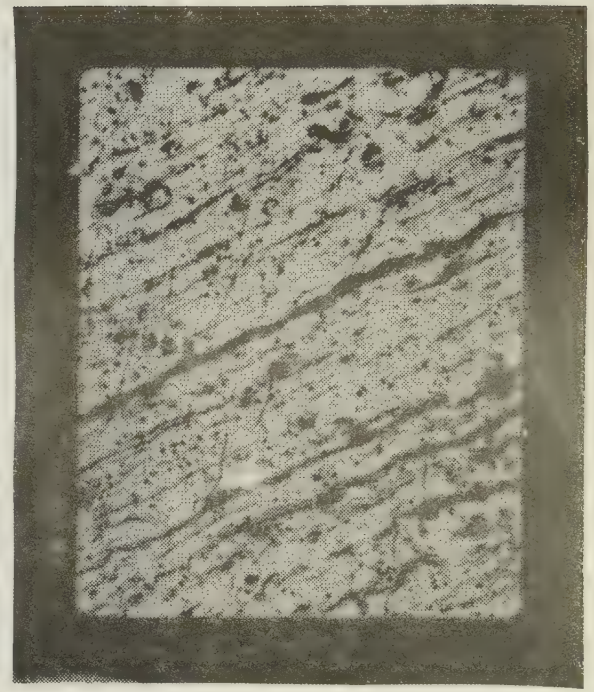
Micrographies électroniques de la surface de l'échantillon d'aluminium avant frottement

Planche 19



20-2 c x 9000

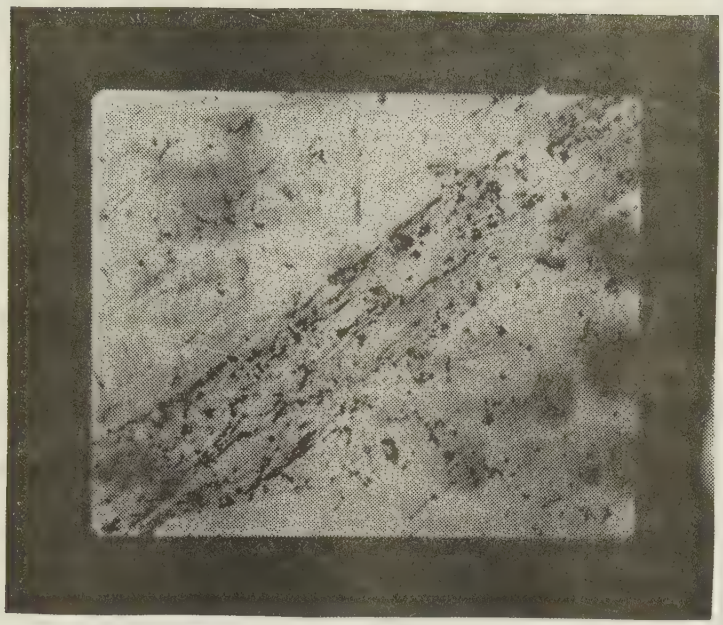
20-1 b x 9000



20-1 a x 3200

Micrographies électroniques de la surface de l'échantillon d'aluminium après frottement
(20-1 a et b, phase 1 - 20-2, phase 2)

Planche 20



21-3-a

x 3200

21-3-b

x 9000

Micrographies électroniques de la surface de l'échantillon d'aluminium après frottement - phase 3

Planche 21

V - 4 Etude de la résistance de contact pendant les phases 1 et 2

Pour préciser l'évolution des couches superficielles pendant les phases 1 et 2 on a mesuré au cours du mouvement alternatif, la résistance de contact d'une couche d'alumine cristallisée très résistante à l'usure comme on le verra dans le chapitre II - paragraphe I - 1 - 2.

Conditions initiales

- Mode de contact bille Ø 10 mm
- Charge 2,16 da N
- Ambiance : huile de vaseline
- Vitesse 1 mm/mn
- Frotteur en X C 38
- Aluminium de nuance A 95 (99,50 % de pureté)
- La surface du frotteur est préparée par polissage à la pâte diamantée, la surface de la plaquette d'aluminium par polissage à l'alumine, la plaquette a été recuite 1/2 h à 600° C.

Evolution de la force de frottement et de la résistance de contact au cours du temps.

La courbe de la figure 102 montre l'évolution de la force de frottement au cours du temps, on reconnait l'existence des phases 1 et 2.

La figure 103 montre l'évolution de la résistance de contact au cours d'un passage du frotteur en acier sur l'échantillon d'aluminium. A l'extrémité de la trace la résistance de contact est plus élevée, car il y a accumulation de débris en bout de trace.

La courbe de la figure 102 montre l'évolution de la résistance de contact au cours du temps. Avant mouvement elle atteint 1 Ω, et au cours du premier passage elle décroît jusqu'à 1 m Ω pour s'accroître progressivement en devenant irrégulière au cours des passages successifs. Ce qui est frappant c'est la faible valeur de la résistance de contact au cours du premier passage.

L'augmentation de la résistance de contact au cours des passages successifs peut avoir plusieurs causes : existence de débris d'usure entre le frotteur et la plaquette, écrouissage de l'aluminium sous-jacent qui va être étudié dans le paragraphe suivant.

.../...

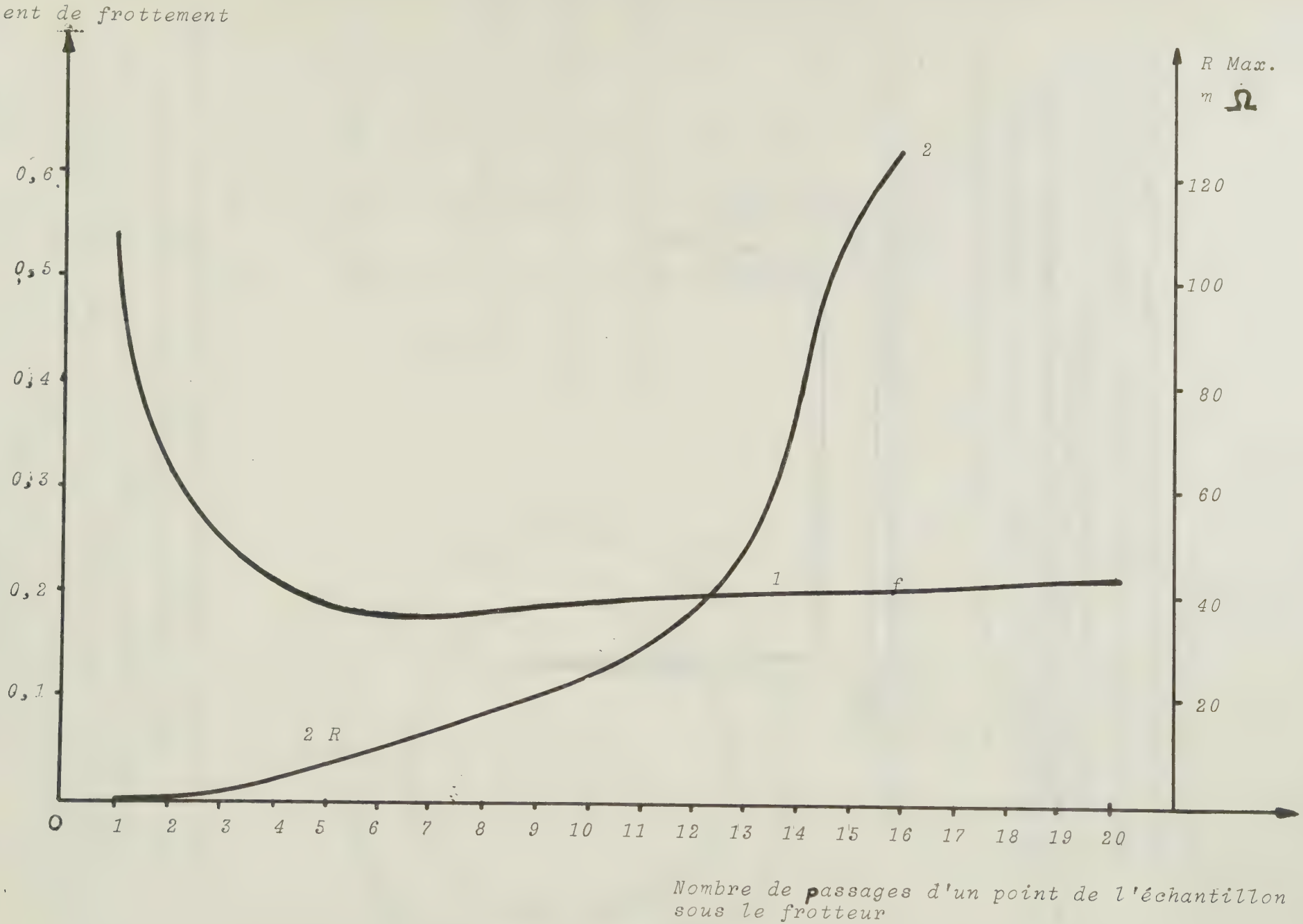


Fig.102 - Evolution du coefficient de frottement (1) et de la résistance de contact (2) au cours du temps en fonction du nombre de cycles

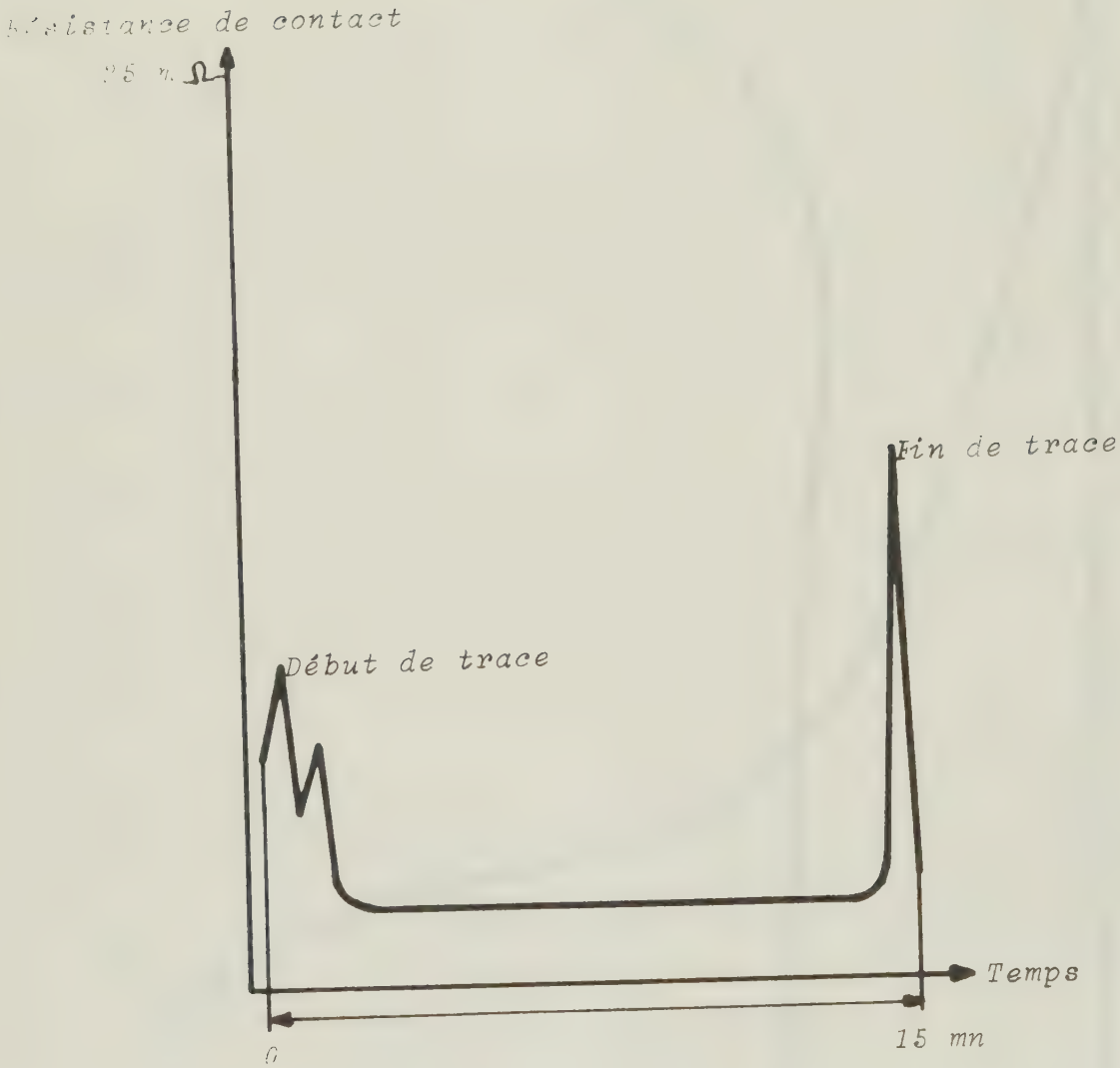


Fig. 103 - Evolution de la résistance de contact au cours d'un passage du frotteur en acier sur l'échantillon d'aluminium

V - 5 Microdureté

Les études de microdureté ont été faites en utilisant un pénétrateur Vickers (179) sous une charge de 0,25 N. Pour faire une série de mesures on déplace le pénétrateur dans une direction perpendiculaire à celle de la vitesse de glissement. On repère la position des empreintes de microdureté en mesurant la distance qui les sépare du milieu de la trace. Il y a trois zones de mesure sur chaque échantillon (Fig. 104). Dans chaque zone on a fait trois séries de mesures dont la disposition est indiquée sur la Fig. 105.

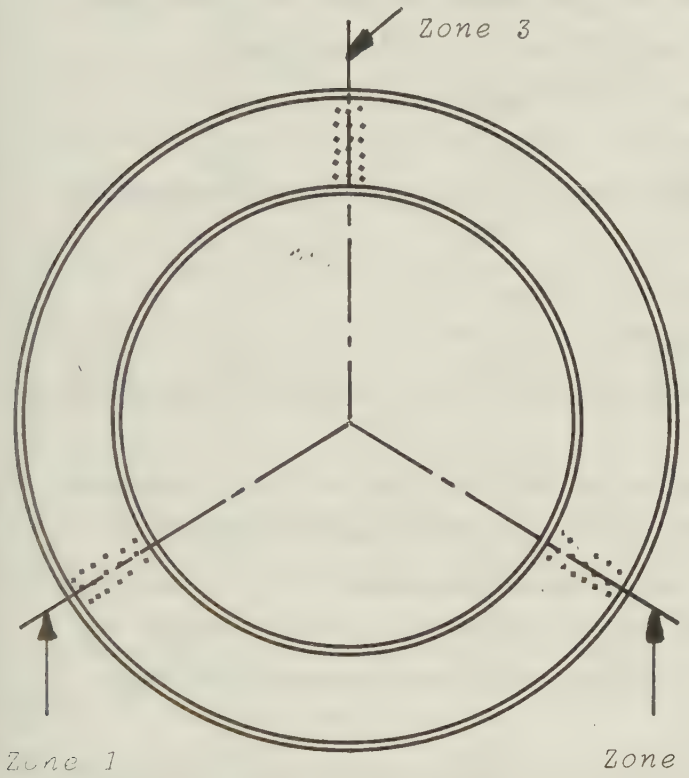


Fig. 104
Disposition des zones de mesures de microdureté

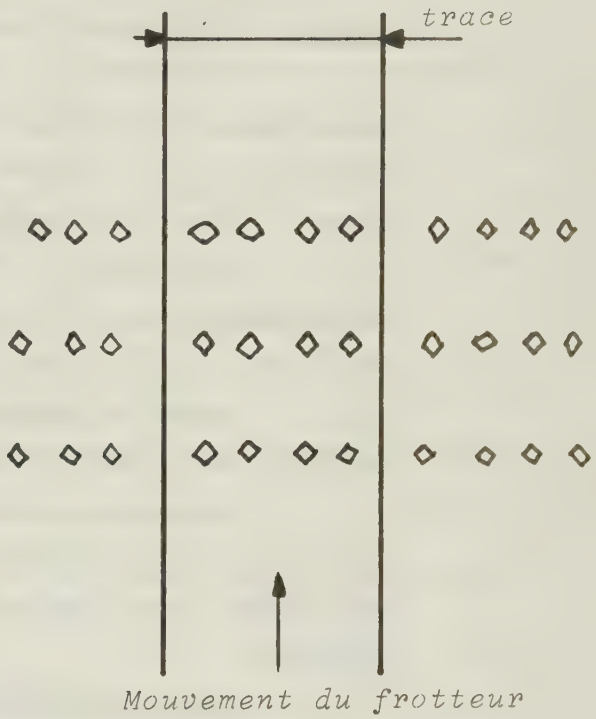


Fig. 105
Disposition des séries de mesures de microdureté

Dans les tableaux de résultats correspondant aux différentes phases on a indiqué pour chaque zone, la moyenne des microduretés obtenues à une certaine distance du milieu de la trace de frottement. Les distances sont comptées positivement lorsque l'on se déplace sur la surface de l'échantillon à partir de l'axe dans la direction du diamètre extérieur. Les chiffres inscrits dans la dernière colonne sont obtenus en faisant la moyenne des résultats de 9 mesures.

.../...

Les résultats obtenus sur les échantillons d'aluminium au cours des phases 1, 2, 3, sont inscrits sur les tableaux 7, 8, 9. On peut calculer l'augmentation relative de microdureté en fond de trace en utilisant les chiffres inscrits dans la dernière colonne. Pour évaluer la microdureté moyenne de l'échantillon avant frottement on fait la moyenne des trois premiers et des trois derniers chiffres. Pour évaluer la microdureté moyenne en fond de trace on fait la moyenne des trois chiffres centraux.

Les résultats obtenus sont les suivants :

Phase 1 - Microdureté avant frottement 19,7 h bar

Microdureté en fond de trace 25,3 h bar

Après un seul passage on constate que la microdureté en fond de trace augmente de 5,6 h bar . L'accroissement relatif est de 28 % environ.

Phase 2 - Microdureté avant frottement 20,8 h bar

Microdureté en fond de trace 27 h bar

La microdureté en fond de trace augmente de 6, 2 h bar . L'accroissement relatif est de 30 % environ.

Phase 3 - Microdureté avant frottement 20,6 h bar

Microdureté en fond de trace 36,6 h bar

La microdureté en fond de trace augmente de 15,9 h bar . L'accroissement relatif est de 43 % environ.

Après le premier passage la microdureté en fond de trace augmente de 28 %. Par la suite l'accroissement de la microdureté semble assez lent.

Les mesures de microdureté en phase 3 sont délicates à cause de la destruction de la surface de l'échantillon d'aluminium. Il faut choisir des zones dans lesquelles les empreintes obtenues ont deux diagonales de même longueur.

Sur la figure 106 on peut voir les courbes de variation de la microdureté en fonction de la distance du centre de l'empreinte au milieu de la trace. Ces courbes sont obtenues, dans le cas des phases 1, 2, 3, en utilisant les chiffres des dernières colonnes des tableaux 11, 12, 13. Ces courbes montrent un durcissement du métal de part et d'autre de la trace de frottement.

.../...

Tableau 11

PHASE N° 1 TABLEAUX DES MOYENNES, DES MICRODURETES VICKERS SOUS 0,25 N DANS CHAQUE ZONE DE MESURE.

Distances du centre des empreintes au milieu de la trace de frottement mm	ZONE 1 h bar	ZONE 2 h bar	ZONE 3 h bar	MOYENNE DES TROIS ZONES h bar
+ 0,9	19,3	19,6	18,6	19,2
+ 0,8	19,8	19,9	18,6	19,4
+ 0,7	19,6	19,1	19,1	19,3
+ 0,6	19,5	19,1	19,8	19,5
+ 0,5	19,4	19,7	19,5	19,5
+ 0,4	20	20,1	20,2	20,1
+ 0,3	21,6	21,2	22,5	21,7
+ 0,2	24	21,6	25,6	23,7
+ 0,1	24,6	24,6	25,2	24,8
0	25,7	26	26	25,9
- 0,1	25,7	25	25	25,2
- 0,2	23,6	23,3	20,5	22,4
- 0,3	21,2	21,4	21	21,2
- 0,4	20,6	21,3	20,6	20,8
- 0,5	20,6	19,9	20,6	20,4
- 0,6	20,3	20	20,3	20,2
- 0,7	21,3	20,1	20,2	20,5
- 0,8	20,2	19,7	20,5	20,1
- 0,9	19,6	19,3	20,5	19,8

.../...

Tableau 12

PHASE N° 2 TABLEAU DES MOYENNES, DES MICRODURETES VICKERS SOUS 0,25N DANS CHAQUE ZONE DE MESURE

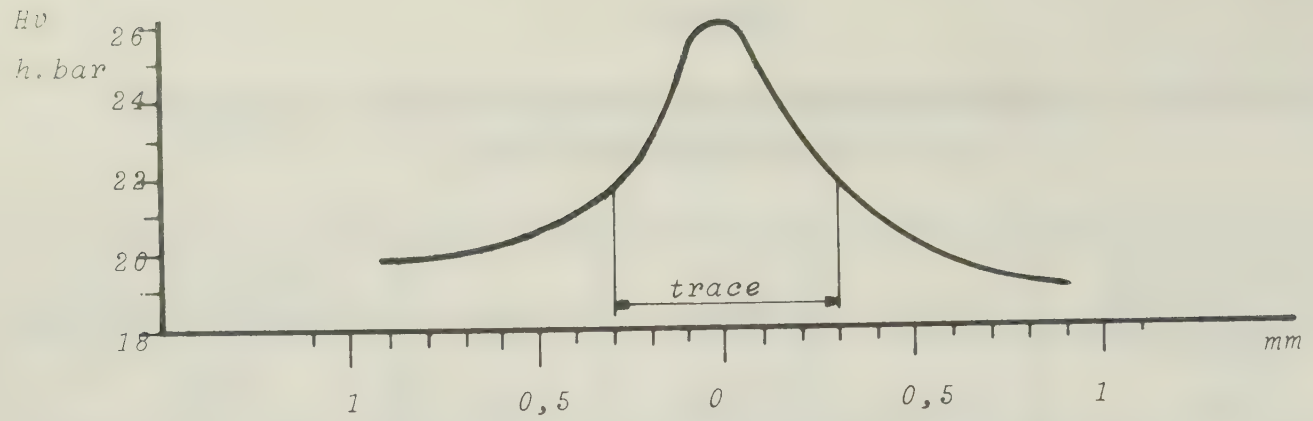
Distance du centre des empreintes au milieu de la trace de frottement mm	ZONE 1 h bar	ZONE 2 h bar	ZONE 3 h bar	MOYENNE DES TROIS ZONES h bar
+ 1,1	20,6	20,8	21,5	21
+ 1	20,8	20,5	20,5	20,6
+ 0,9	20,6	21,4	21	20,7
+ 0,8	21,2	21,6	21,4	21,3
+ 0,7	21	25	20,6	23,2
+ 0,6	21,6	23,2	21,8	22,2
+ 0,5	21,8	25,6	21,2	22,8
+ 0,4	22,8	22,6	22,1	22,5
+ 0,3	26	24,8	22,1	24,3
+ 0,2	26,3	27	25,8	26,4
+ 0,1	26,8	28,5	26,6	27,3
0	27,2	26,6	27,2	27
- 0,1	27,5	27,3	25,8	26,8
- 0,2	25,4	27,2	27,2	26,6
- 0,3	22,5	23,3	27,1	24,3
- 0,4	21,8	21,3	23,5	22,2
- 0,5	21,5	22	22,8	22,2
- 0,6	21,2	21,5	21,8	21,7
- 0,7	20,8	21,9	21,5	21,5
- 0,8	21,2	21,6	21,5	21,4
- 0,9	20,8	21,2	21,5	21,2
- 1	20,8	21,4	20,5	20,9
- 1,1	20,3	20,3	20,8	20,5

.../...

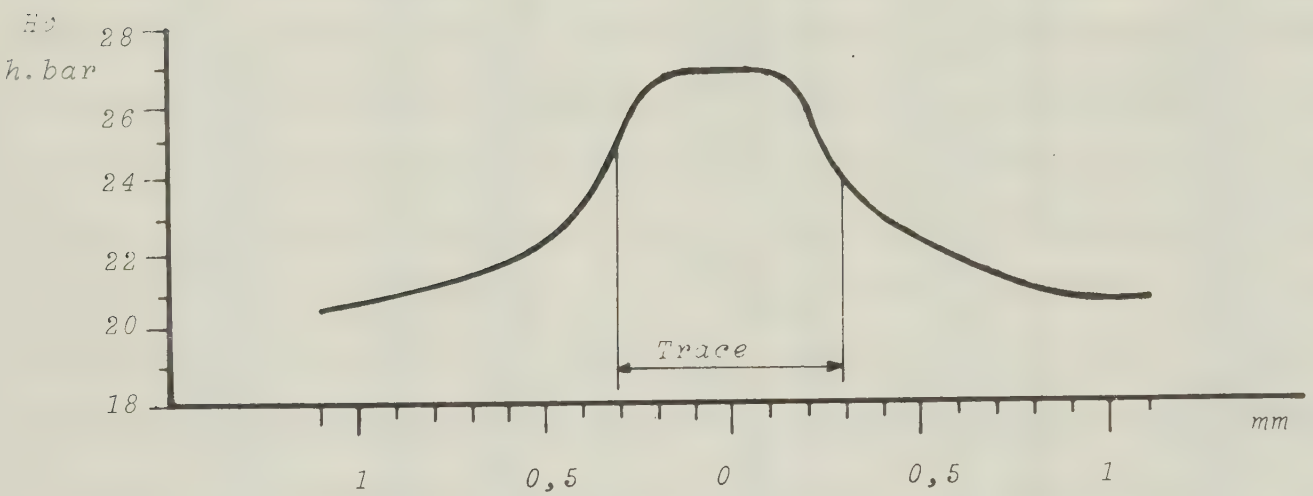
Tableau 13

PHASE N° 3 TABLEAU DES MOYENNES DES MICRODURETES VICKERS SOUS 25 N DANS CHAQUE ZONE DE MESURE

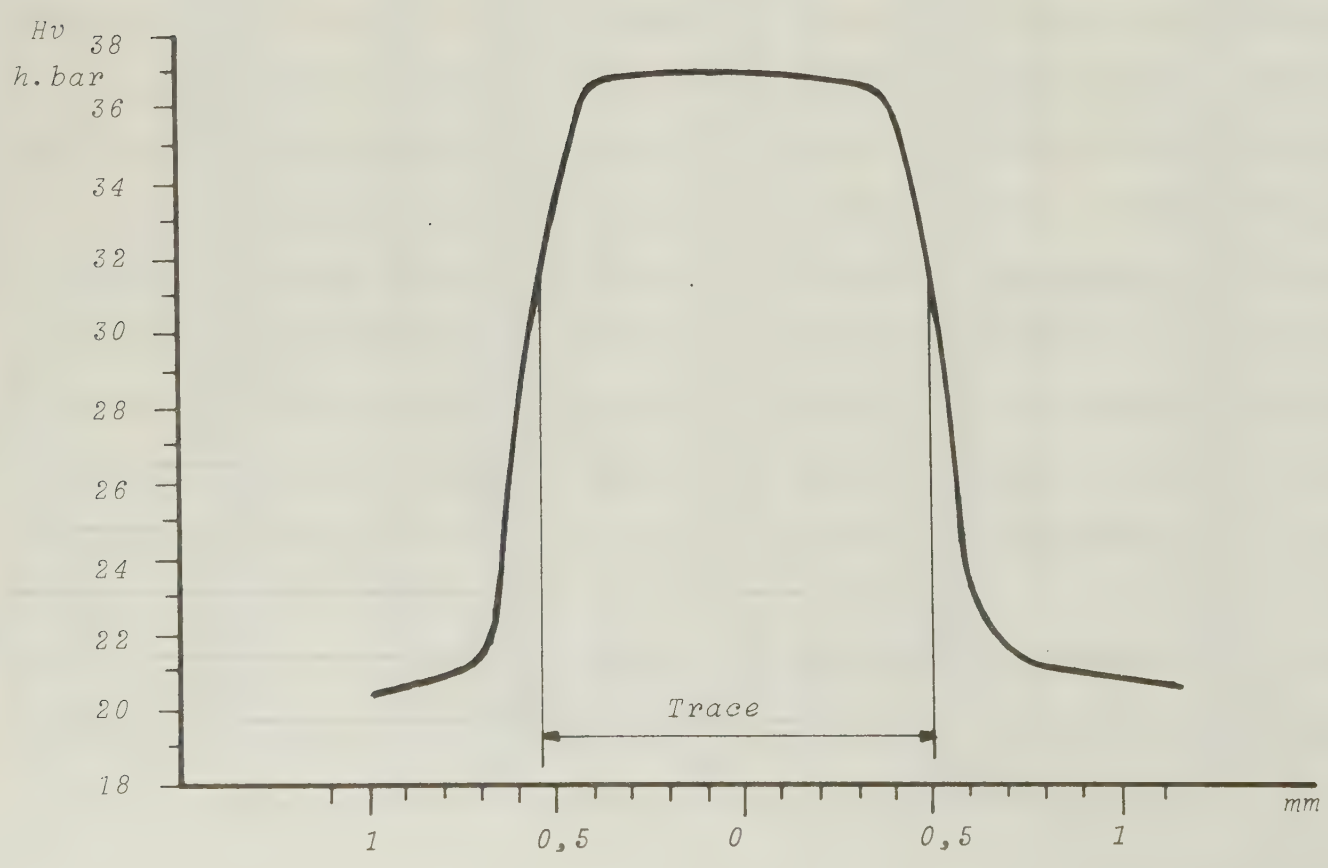
Distance du centre des empreintes au milieu de la trace de frottement mm	ZONE 1 h bar	ZONE 2 h bar	ZONE 3 h bar	MOYENNE DES TROIS ZONES h bar
+ 1,1	19,8	21,2	21,3	21,1
+ 1	20	20,8	20	20,3
+ 0,9	20,4	20,8	21,5	20,9
+ 0,8	19,8	21,3	22,1	21
+ 0,7	22,8	21,8	22,6	22,4
+ 0,6	25,3	24,3	24,4	24,7
+ 0,5	32	32	32	32
+ 0,4	34,2	39,3	38,3	37,6
+ 0,3	36	36	38,3	36,7
+ 0,2	36	33,4	38,3	35,9
+ 0,1	36,3	32,6	38,3	35,4
0	36,5	34,6	39,5	36,9
- 0,1	36	36,4	40,6	37,6
- 0,2	34,5	37,1	39,9	37,2
- 0,3	35,3	37,8	38,4	37,2
- 0,4	34	33,5	37,4	35
- 0,5	33,6	36,3	37,3	35,7
- 0,6	32	32,8	34,6	33,1
- 0,7	20,3	21	21,8	21
- 0,8	20,6	20,8	21,2	20,9
- 0,9	19,2	20	22	20,4
- 1	20	19,6	22	20,5



Phase 1



Phase 2



Phase 3

Fig. 106 - Microdureté en fonction de la distance du centre de l'empreinte au milieu de la trace

V-6 Etude de la recristallisation d'échantillons d'aluminium

Cette étude a été effectuée à l'aide du tribomètre alternatif. Car il est facile de partir d'échantillons découpés dans de la tôle d'aluminium de définir la grosseur de grains avant frottement.

L'écrouissage subi par l'aluminium dans la trace de frottement peut-être mis en évidence par la méthode de recristallisation. Le processus utilisé est le suivant :

1°) Après frottement l'échantillon est dégraissé par immersion dans une cuve à ultra-sons contenant du trichloréthylène.

2°) Recuit à 600° C à l'air pendant 1 heure.

3°) Après refroidissement attaque au triacide dont la composition en volume est la suivante : HNO_3 47 %, HCl 50 %, HFH 3 %.

La planche 22 montre la recristallisation de l'aluminium dans la trace de frottement après 1 et 5 passages. Ce qui correspond, dans les conditions de l'expérience aux phases 1 et 2 respectivement. Les conditions initiales sont données sur la planche 22. En observant les photographies on peut faire les remarques suivantes :

1°) Après 1 passage on dénombre 3 grains. L'écrouissage est visible, à l'intérieur et à l'extérieur de la trace de frottement. En particulier cette méthode met en évidence l'écrouissage au bord et en avant de la trace. On remarque l'existence en avant de la trace d'une zone écrouie correspondant au bourrelet frontal étudié par COURTEL . . On voit que le frotteur glisse sur une surface qui est transformée par le processus même du frottement.

2°) Le nombre de grains visibles dans la trace augmente avec le nombre de passages. On peut ainsi observer le vieillissement de l'aluminium sous l'effet des passages successifs du frotteur.

On sait [180] que dans le cas de la traction, la grosseur de grain diminue quand l'écrouissage du métal augmente (Fig 107).

Nous avons étudié systématiquement la variation de la grosseur de grain en fonction du nombre de passages dans la trace de frottement. On trouve un résultat analogue (Fig 108). Les conditions initiales sont précisées sur la figure. Ainsi on voit que la destruction de la couche d'alumine protectrice est accompagnée du vieillissement de la couche métallique sous-jacente.

.../...

Planche 22

Recristallisation de l'aluminium dans les traces de frottement

1) après 1 passage

2) après 5 passages

Conditions initiales :

- Contact : bille de Ø 5
- Ambiance : huile de vaseline
- Charge : 4,16 da N
- Vitesse de glissement : 1 mm/mn
- Le frotteur est en acier à roulement de nuance
- L'aluminium de nuance : 99,99 (99,99 % de pureté)
- La plaquette brute de laminage a été recuite 1/2 heure à 600° C

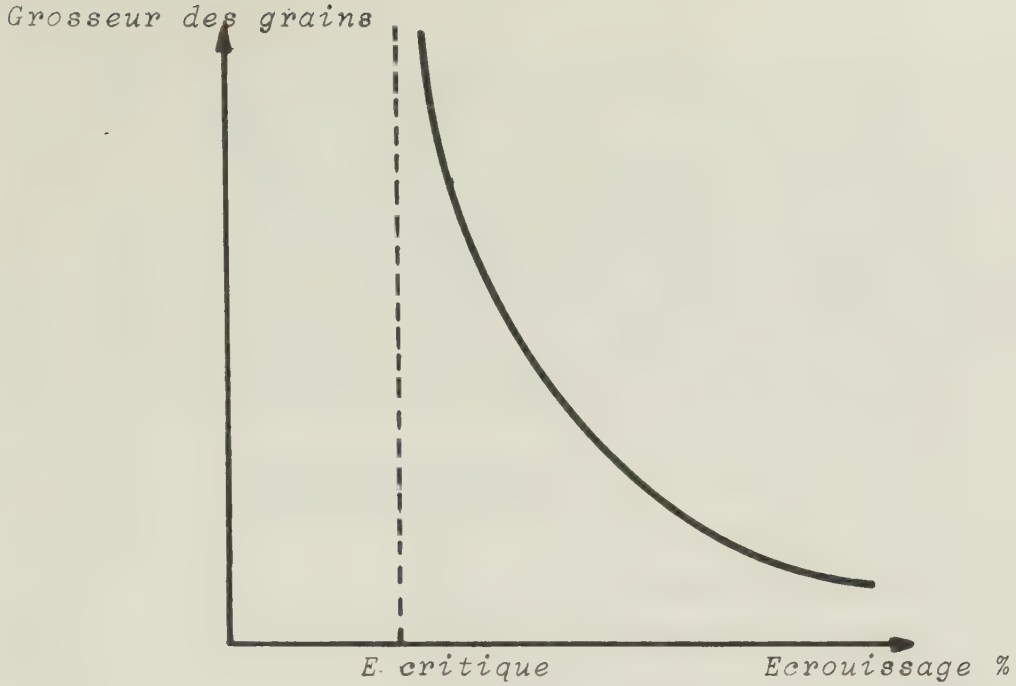


Fig. 107 - Grosseur de grain après recristallisation en fonction de l'écrouissage d'après (115)

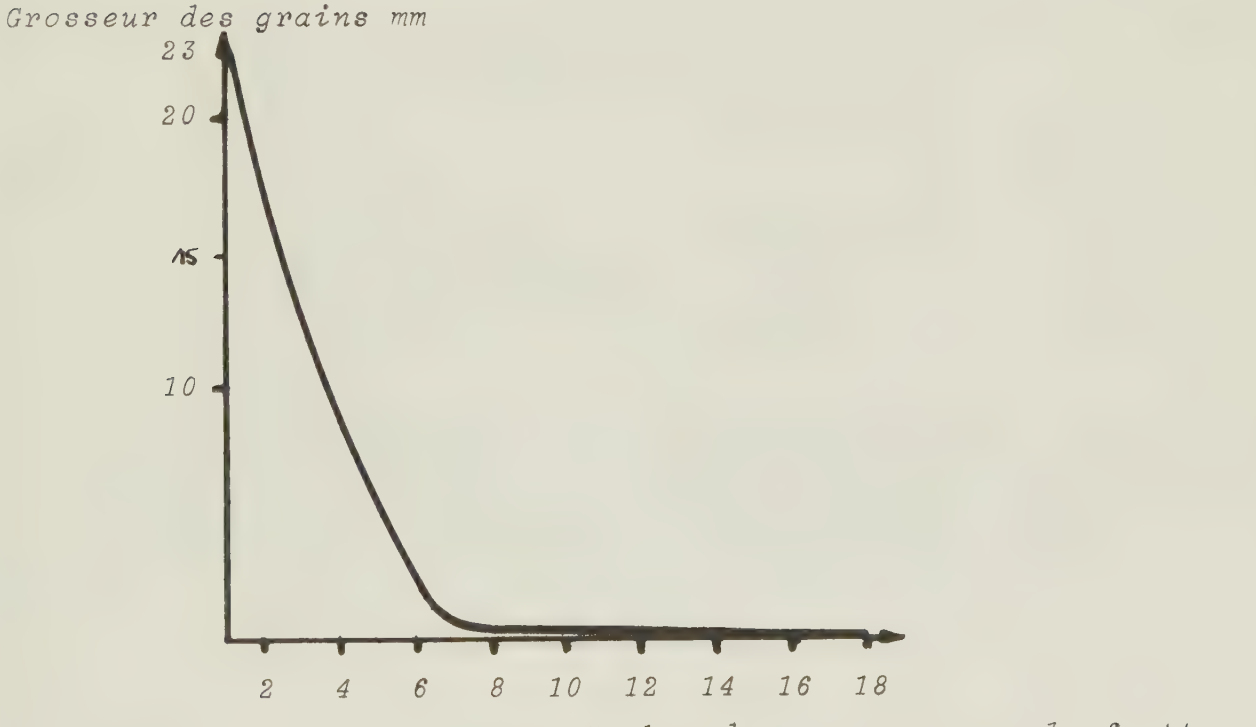


Fig. 108 - Evolution de la grosseur de grain après recristallisation en fonction du nombre de passages d'un point de l'échantillon d'aluminium sous le frotteur en acier.

Conditions d'essais : Contact : bille Ø 5
Ambiance : huile de vaseline - Charge : 1,16 da N
La bille est en acier à roulement
La plaquette d'aluminium de nuance A 99, a été recuite 2 heures à 600° C avant frottement

V-7 - Influence de l'écrouissage sur le passage de la première à la deuxième phase.

Nous comparons les coefficients de frottement obtenus lorsque le frotteur se déplace d'une part sur une éprouvette recuite et d'autre part sur une éprouvette écrouie par traction. Afin de démontrer que c'est bien l'écrouissage de l'aluminium qui est responsable de la diminution de la résistance au déplacement lorsque l'on effectue le 2ème passage.

Conditions initiales

- Mode de contact : bille Ø 20 mm sur plan
- Charge sur la bille : 50 da N et 100 da N
- Vitesse de déplacement : 30 μ m/s
- Ambiance : huile de vaseline surrafinée
- Matériaux en présence :
  a) bille Ø 20 mm en 100 C 6
  b) Eprouvette en aluminium recuite
     polie 5 grains...800 + alumine 12 heures
  c) Eprouvette d'aluminium écrouie par allongement de 20%

Résultats expérimentaux

	Charge	Coefficient de frottement
- Eprouvette recuite	50 da N	0,67
- Eprouvette écrouie par allongement de 20 % à la traction	50 da N	0,58
	100 da N	0,60

L'écrouissage doit être considéré comme l'un des responsables de la diminution du coefficient de frottement au cours du deuxième passage dans une trace, car sur cette surface durcie le travail de labourage diminue.

VI - ETAT DE SURFACE DU FROTTEUR

Les études décrites dans les paragraphes V - 1, 2, 3, 5 ont été effectués avec un seul et même frotteur. Après essai il est nettoyé par immersion dans une cuve à ultra-sons contenant du trichloréthylène. Avant chaque expérience sa surface était préparée dans des conditions identiques. Son état de surface avant frottement est obtenu par polissage mécanique sur un tour à l'aide de papiers abrasifs et de tampons imprégnés de pate diamantée.

Son état de surface a été étudié en utilisant la technique des vernis Jacquet [169]. On a fait des répliques de la surface du frotteur lorsque les trois échantillons d'aluminium utilisés ont fait respectivement 3/4 de tour, 4 tours, 274 tours. Ces rotations correspondent aux trois phases visibles sur la figure 90. Les répliques ont été examinées à l'aide du microscope métallographique en utilisant le contraste interférentiel Nomarski. Sur les planches 21, 22, 23 on peut voir les photographies des répliques obtenues.

Pendant la phase 1 (photo 23-1) la surface du frotteur en acier, qui paraît plus lisse que dans son état original, présente des rayures parallèles à la direction du glissement.

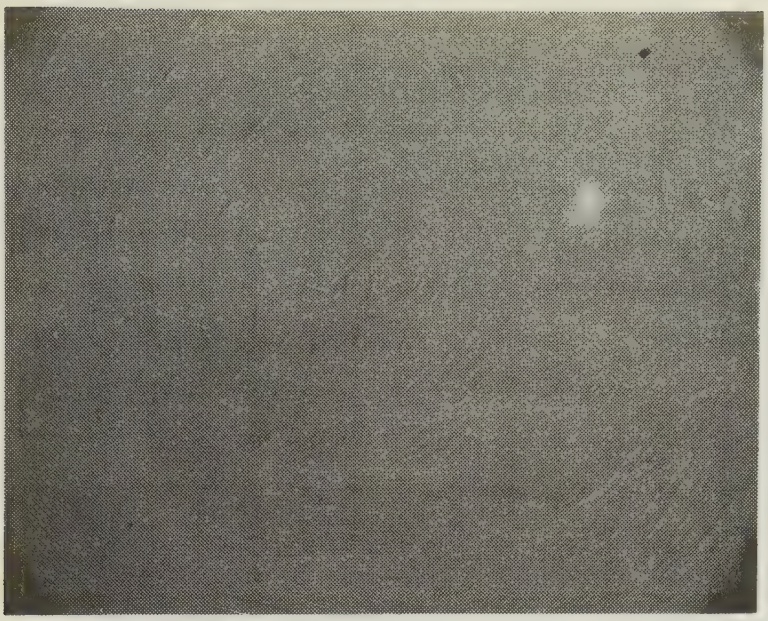
Au cours de la phase 2 (photo 24-2) les rayures sont plus longues et plus nombreuses que pendant la phase 1.

Pendant la phase 3 (photo 25) il y a un transfert d'aluminium sur le frotteur et formation d'une arête rapportée en amont du mouvement.

Pendant les phases 1 et 2 le frotteur en acier est soumis principalement au mode d'usure par abrasion. L'alumine dure, partiellement cristallisée, qui recouvre la surface de l'échantillon d'aluminium polit la surface du frotteur et parvient même à la rayer.

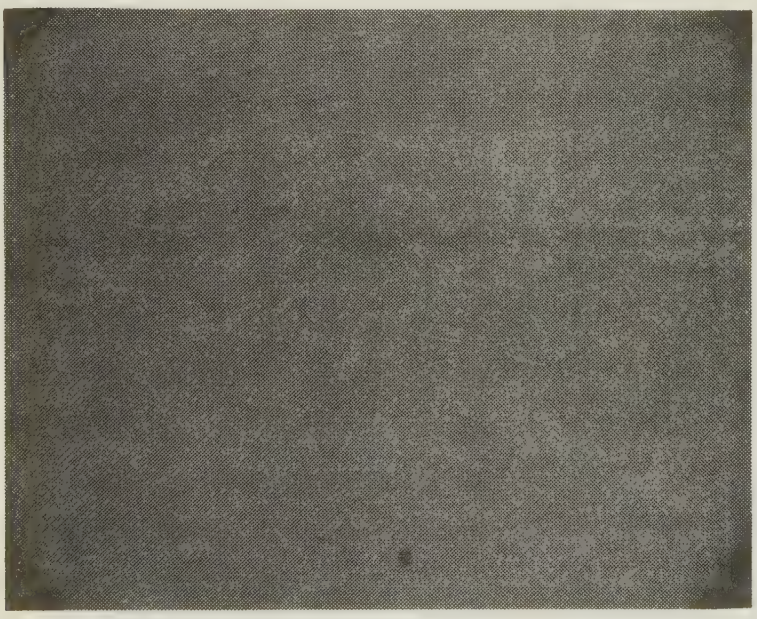
Au cours de la phase 3 c'est le mode d'usure par adhésion qui prédomine. Il y a un transfert d'aluminium sur le frotteur et formation d'une arête rapportée en amont du mouvement. Cette arête rapportée est analogue à celle qui a été observée par ANTLER (37) au cours d'expériences effectuées à l'aide d'un frotteur de cuivre en glissant à sec sur la surface d'un échantillon du même métal.

.../...



x 100

Etat de surface initial du frotteur avant l'étude de la phase 1



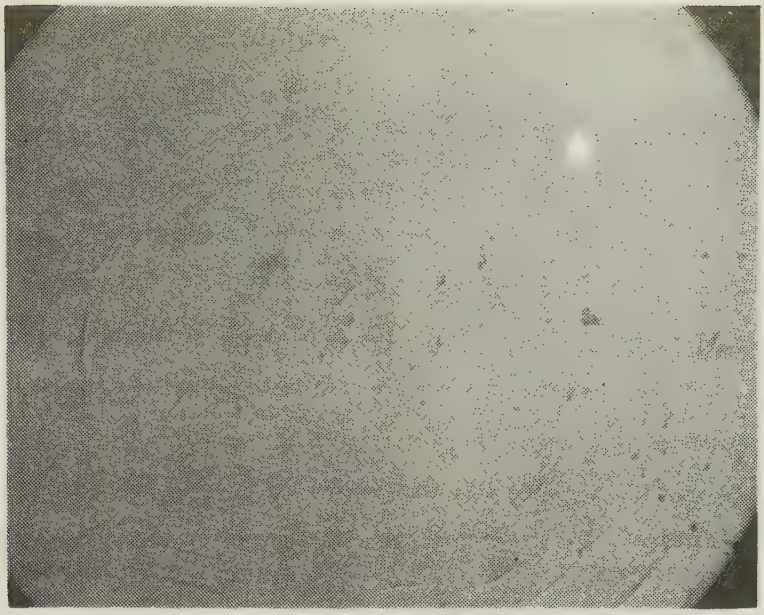
x 100

Direction du frotteur

Etat de surface du frotteur pendant la phase 1

La flèche indique la direction du glissement

Planche 23



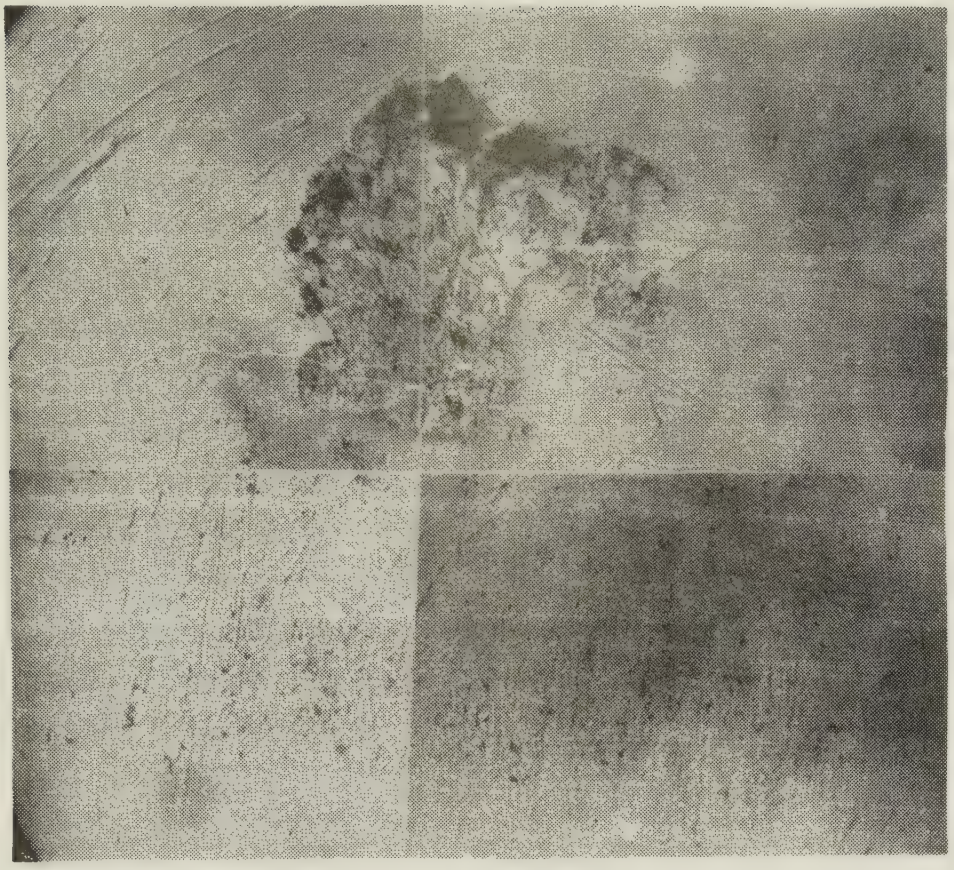
x 90

Etat de surface initial du frotteur avant l'étude de la deuxième phase

x 90

Etat de surface du frotteur pendant la phase 2

Planche 24



x 90

Etat de surface du frotteur pendant la phase 3

Planche 25

VII - EVOLUTION DE LA PURETE DU LUBRIFIANT

Le lubrifiant utilisé dans cette série d'expérience est l'huile de vaseline. Avant essai cette huile est claire. Pendant les phases 1 et 2 la coloration du lubrifiant ne change pas. Dès le début de la phase 3 l'huile se charge en particules d'usure. Quand l'échantillon d'aluminium a fait 274 tours, l'huile paraît noirâtre et si on l'examine à l'aide d'une loupe binoculaire on observe qu'elle contient des particules brillantes, d'aspect métallique. Les particules d'usure en suspension dans l'huile sont constituées principalement de particules d'aluminium. Ceci correspond bien aux aspects superficiels de l'échantillon, observés au microscope électronique.

VIII - CORRESPONDANCE ENTRE LES PHASES SUCCESSIVES DU GRAPHE DE FROTTEMENT ET LES ENDOMMAGEMENTS SUBIS PAR LA SURFACE DE L'ECHANTILLON D'ALUMINIUM.

Cette étude a été effectuée à l'aide du dispositif porte-frotteur n° 1.

Dans le cas où les trois phases sont observables sur le graphe de frottement on peut montrer qu'elles sont liées à des modifications subies par la surface de l'échantillon d'aluminium et non à des modifications de la surface du frotteur en acier.

Pour faire cette démonstration on prend les frotteurs et les échantillons dans leur état au cours des phases 1, 2, 3 et on les fait glisser sur des surfaces antagonistes qui sont dans leur état initial. Cela veut dire que sur des échantillons vierges on fera glisser des frotteurs usagés et que sur des échantillons usagés on fera glisser des frotteurs vierges.

On appelle E_o, E_1, E_2, E_3 et F_o, F_1, F_2, F_3 les états de surface géométrique et physicochimique des échantillons en aluminium et des frotteurs en acier avant glissement et au cours des phases 1, 2, 3. Au cours des expériences où on peut observer l'existence de trois phases successives sur le graphe de frottement, on a tour à tour les contacts suivants :

E_o F_o

E_1 F_1

E_2 F_2

E_3 F_3

Si on veut étudier le glissement d'un frotteur usagé sur un plan vierge il faut étudier les contacts : F_1 E_o, F_2 E_o, F_3 E_o.

Pour étudier le glissement d'un frotteur vierge sur un plan usagé il faut étudier les contacts : F_o E_1, F_o E_2, F_o E_3.

.../...

N étant le nombre de rotations effectuées par l'échantillon d'aluminium avant essai, convenons d'utiliser les notations $F_i^N E_o$ dans le cas d'un frotteur usagé glissant sur un échantillon vierge et $F_o E_i^N$ dans le cas d'un frotteur vierge glissant sur un échantillon usagé, avec i = 1, 2, 3

Ainsi la notation $F_3^{230} E_o$, veut dire que sur échantillon vierge (E_o) on fait glisser un frotteur qui au cours d'une expérience antérieure a frotté sur un échantillon d'aluminium pendant 230 rotations de ce dernier. L'expérience ayant été arrêtée alors que la phase trois était déjà apparue sur le graphe de frottement.

La rotation $E_3^{100} F_o$ signifie que le frotteur vierge F_o glisse sur un échantillon ayant effectué 100 rotations au cours d'une expérience antérieure. L'essai a été arrêté au cours de la phase 3.

VIII - 1 Conditions initiales

- Contact : frotteur hémisphérique, diamètre de la calotte sphérique 10 mm
- Ambiance : huile de vaseline
- Charge : 1 da N
- Vitesse de glissement : 4,07 mm/s
- Le frotteur est en acier mi-dur durci par carbonitruration
- Les échantillons sont en aluminium de nuance A 5 99,5 % de pureté.
- L'état de surface du frotteur avant frottement est obtenu par polissage à la pate diamantée.
- Les états de surface des échantillons d'aluminium sont obtenus par tournage et par polissage à l'alumine.
- Les échantillons d'aluminium sont ensuite recuits 45 mn à la température de 600° C dans un four à air.

VIII - 2 Evolution du coefficient de frottement au cours du temps

1) Surfaces préparées par tournage

Les types de contact étudiés dans cette série d'expériences sont données dans le tableau 14 ci-après

Type de contact	N°	N° du frotteur	Nbre de rotations effectuées par les échantillons antagonistes du frotteur			Nbre de rotations effectuées par les échantillons d'aluminium au cours de l'expérience		
			Av.	Pdt.	Total	Av.	Pdt.	Total
F_2^{150} E_o	8	6	150	200	350	0	200	200
F_1^{10} E_o	9	7	10	220	230	0	220	220
F_3^{230} E_o	10	7	230	200	430	0	200	200
E_3^{100} F_o	11	8	0	50	50	100	50	150

Tableau 14

Les résultats concernant la valeur du coefficient de frottement pendant chaque passage sont donnés dans le tableau 15

.../...

C \ N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	15	20	25	26	27	28	29	30	40	50	60	70	80
E_2^{10} E_o	0,37	0,26	0,23	0,21	0,20	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,15	0,18	0,23	0,22	0,22
F_2^{150} E_o	0,30	0,20	0,19	0,17	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,18	0,20	0,21
F_2^{230} E_o	0,34	0,23	0,20	0,18	0,17	0,15	0,14	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,15	0,20	0,25	0,25	0,25
E_3^{100} F_o	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22

Echantillons d'aluminium dont les surfaces ont été préparées par tournage et avivage.

Frotteurs usagés sur échantillons vierges et frotteur vierge sur échantillon usagé.

Tableau 15

N : Nombre de rotations effectuées par l'échantillon d'aluminium

C : Type de contact

Dans le cas où un frotteur usagé frotte sur un échantillon vierge (contact $F_3^{230} E_o$) les chiffres inscrits montrent que les trois phases sont visibles sur le graphe de frottement. Tandis que si un frotteur vierge glisse sur un échantillon usagé (contact $E_3^{100} F_o$) le coefficient de frottement garde une valeur constante et élevée.

Les échantillons d'aluminium 8, 9, 10, 11 n'ont pas été avivés selon le même processus après tournage. Mais on constate que chaque fois qu'un frotteur usagé glisse sur un plan vierge il y a apparition des trois phases successives.

Pour plus ample information on donne ci-après une étude détaillée qui a été effectuée sur des surfaces préparées par polissage d'alumine.

2) Surfaces préparées par polissage à l'alumine.

Sur ce type de surface comme on le verra dans le chapitre 2 (Paragraphe I - 1 - 2) on observe l'existence des phases 1 et 2. La phase 3 n'est pas visible dans nos conditions d'expérience.

Les types de contact sont donnés dans le tableau 16

Type de contact	N° de l'échantillon d'aluminium	N° du frotteur en acier	Nbre de rotation effectuées par les échantillons d'aluminium antagonistes du frotteur			Nbre total de rotations effectuées par l'échantillon d'aluminium utilisé pendant l'expérience		
			av.	pdt.	ap.	av.	pdt	ap.
$F_o E_o$	1	1	0	2	2	0	2	2
$F_o E_o$	2	2	0	3	3	0	3	3
$F_o E_o$	3	3	0	40	40	0	40	40
$F_1^3 E_o$	4	2	3	15	18	0	15	15
$F_2^{40} E_o$	5	3	40	85	125	0	85	85
$F_2^{314} E_o$	6	4	314	450	764	0	450	450
$E_1^2 F_o$	1	4	0	314	314	2	314	316
$E_1^3 F_o$	2	5	0	32	32	3	32	35
$E_2^{85} F_o$	5	6	0	150	150	85	150	235
$E_2^{316} F_o$	7	7	0	10	10	316	10	326

Tableau 16

Les résultats concernant la valeur du coefficient de frottement à chaque passage sont donnés dans le tableau 17

C \ N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
E_o E_o	0,46																								
F_o E_o	0,45	0,28	0,20																						
F_o E_o	0,44	0,28	0,21	0,18	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
F_1^3 E_o	0,40	0,24	0,20	0,19	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
F_2^{40} E_o	0,44	0,28	0,22	0,16	0,17	0,17	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
F_2^{314} E_o	0,44	0,33	0,27	0,23	0,21	0,20	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17

Echantillons d'aluminium dont les surfaces ont été polies à l'alumine, frotteurs usagés sur pistes vierges

;

C \ N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
E_1^1 F_o	0,35	0,26	0,23	0,21	0,20	0,19	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
E_1^3 F_o	0,23	0,18	0,16	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
E_2^{85} F_o	0,17	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
E_2^{316} F_o	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15															

Echantillons d'aluminium dont les surfaces ont été polies à l'alumine, frotteurs vierges sur pistes usagés

N : Nombre de rotations de l'échantillon d'aluminium

C : Type de contact

Tableau 17

Si on considère le cas d'un frotteur usagé glissant sur un plan vierge (contact $F_2^{314} E_o$) on voit réapparaître les phases 1 et 2. Tandis que si un frotteur vierge glisse sur un plan usagé (contact $E_2^{316} F_o$) la phase 2 se maintient comme si le changement de frotteur n'avait pas eu lieu.

VIII - 3 Discussion des résultats

En étudiant les tableaux 15 et 17 on peut faire les remarques suivantes :

1°) Si au cours d'une des phases on fait glisser un frotteur vierge dans une trace effectuée antérieurement les variations de la force de frottement s'effectuent comme si le changement de frotteur n'avait pas eu lieu.

2°) Si le frotteur, après une durée quelconque de glissement est placé dans l'état qui est le sien, sur un échantillon vierge, on voit réapparaître les phases successives.

Dans le cas où il n'y a pas destruction de la surface de l'échantillon d'aluminium dès le premier passage. L'allure de la courbe montrant l'évolution du coefficient de frottement au cours du temps traduit donc bien les transformations et endommagements superficiels de l'échantillon d'aluminium.

IX - DISCUSSION GENERALE

On a étudié l'endommagement et les transformations de la surface d'un échantillon d'aluminium sous l'effet des frottements successifs d'un frotteur en acier. Le rôle de l'adhésion a été réduit par la présence de l'huile de vaseline sur la surface de l'échantillon d'aluminium oxydé thermiquement. Dans ces conditions, on observe trois phases successives sur le graphe montrant la variation de la force de frottement au cours du temps. Ces trois phases traduisent les transformations et endommagements des couches superficielles de l'échantillon en aluminium. Elles ont été étudiées à l'aide de différentes techniques de tribométrie : mesure de la force de frottement et des accélérations du porte-frotteur, étude des surfaces frottantes par les techniques de : réplique par vernis polymérisable à froid, profilométrie électromécanique, micrographie électronique, résistance de contact, microdureté, recristallisation.

Résumons les résultats obtenus :

Première phase -

Le frotteur en acier glisse sur la surface d'un échantillon d'aluminium recuit. On observe l'existence d'un glissement saccadé : le frottement est irrégulier, les accélérations du porte-frotteur sont de grande amplitude à certains moments le frotteur est collé sur l'échantillon d'aluminium. Au cours du premier passage la surface de l'échantillon est déformée, et on observe en fond de trace un accroissement de 28 % de la microdureté, des expériences de recristallisation montrent que l'aluminium est écroui sur les bords et en avant de la trace. A l'échelle de l'observation visuelle et des techniques de répliques par vernis polymérisable à froid l'état de surface dans la trace de frottement s'est amélioré. La surface du frotteur présente de fines rayures parallèles à la direction du glissement, elles sont dues à l'action abrasive de l'alumine recrouvrant la surface antagoniste.

Deuxième phase -

Sur ces couches superficielles écrouies mais restées lisses, le frotteur en acier éprouve une résistance de frottement plus faible. Le glissement saccadé disparaît. Le frotteur ne colle plus sur la surface de l'échantillon. L'amplitude des accélérations du porte-frotteur diminue. Dès le deuxième passage l'amplitude maximale de l'accélération du frotteur dans la direction du glissement est divisée par quatre. L'état de surface de l'échantillon d'aluminium dans la trace de frottement paraît lisse. Cependant la micrographie électronique montre l'existence de destructions localisées. Les rayures sur la surface du frotteur sont plus nombreuses.

.../...

Troisième phase -

La force de frottement s'accroît en devenant irrégulière, ce qui est caractéristique d'accidents locaux. Les amplitudes des accélérations du porte-frotteur augmentent. Les études des états de surface montrent à toutes les échelles d'observation la destruction de l'état de surface de l'échantillon d'aluminium. Il se forme une arête rapportée sur la surface du frotteur. L'huile se charge en particules d'usure.

On voit donc qu'à condition de limiter le rôle de l'adhésion au cours du premier passage, on permet à l'écrouissage des couches superficielles de jouer un rôle favorable dans la vie ultérieure de la pièce en aluminium. La valeur élevée du coefficient de frottement au cours du premier passage peut s'expliquer par la valeur de l'aire de contact et par l'importance du travail de déformation. Au cours des passages suivants, l'aire de contact diminue, car il y a déjà eu formation d'un sillon, et dans la surface durcie le frotteur s'enfonce moins. Le frottement faible et régulier disparaît avec la destruction progressive de la surface de l'échantillon d'aluminium.

L'oxyde qui avec le lubrifiant empêche l'aluminium d'adhérer à l'acier joue un rôle important. C'est pourquoi il convient maintenant d'analyser le rôle de la nature des surfaces, ainsi que d'étudier l'efficacité du lubrifiant.

CHAPITRE 2 -

ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA NATURE DES SURFACES FROTTANTES SUR L'APPARITION DES DIFFERENTES PHASES DANS LE DIAGRAMME DE FROTTEMENT.

Dans ce chapitre nous étudierons l'influence de la nature des surfaces frottantes sur l'apparition des différentes phases dans le diagramme de frottement. C'est-à-dire l'influence de l'état d'oxydation des échantillons d'aluminium et de la structure de l'acier du frotteur.

I - ETUDE DE L'INFLUENCE DE L'OXYDATION DE L'ECHANTILLON D'ALUMINIUM SUR L'APPARITION DES DIFFERENTES PHASES DANS LE DIAGRAMME DE FROTTEMENT.

I - 1 Surfaces générées par les procédés variés et oxydés thermiquement.

Dans cette série d'expériences effectuées à l'aide du dispositif porte-frotteur n° 1 on a enregistré la force de frottement.

Le traitement d'oxydation thermique consiste à recuire l'échantillon d'aluminium pendant 45 mn dans un four, à l'air, à 600° C.

I - 1-1 Conditions initiales

- Contact : frotteur hémisphérique, diamètre de la calotte sphérique 10 mm
- Ambiance : huile de vaseline
- Charge : 1 da N
- Vitesse de glissement : 4,07 mm/s
- Le frotteur est en acier de nuance XC 38, durci par carbonitruration. L'aluminium est de nuance A 5 (c'est-à-dire à 99,5 % de pureté).
- L'état de surface du frotteur avant glissement est obtenu par polissage à la pâte diamantée. Les états de surface des échantillons d'aluminium avant glissement ont été obtenus par les processus suivants : tournage, polissage sur papier abrasif, polissage à l'alumine, polissage électrolytique au tampon.

I - 1 - 2 Variation du coefficient de frottement au cours du temps

Les valeurs des coefficients de frottement à chaque passage sont donnés dans le tableau 18 (annexe 2).

Les courbes de la figure 103 sont tracées en utilisant les chiffres inscrits sur ce tableau.

.../...

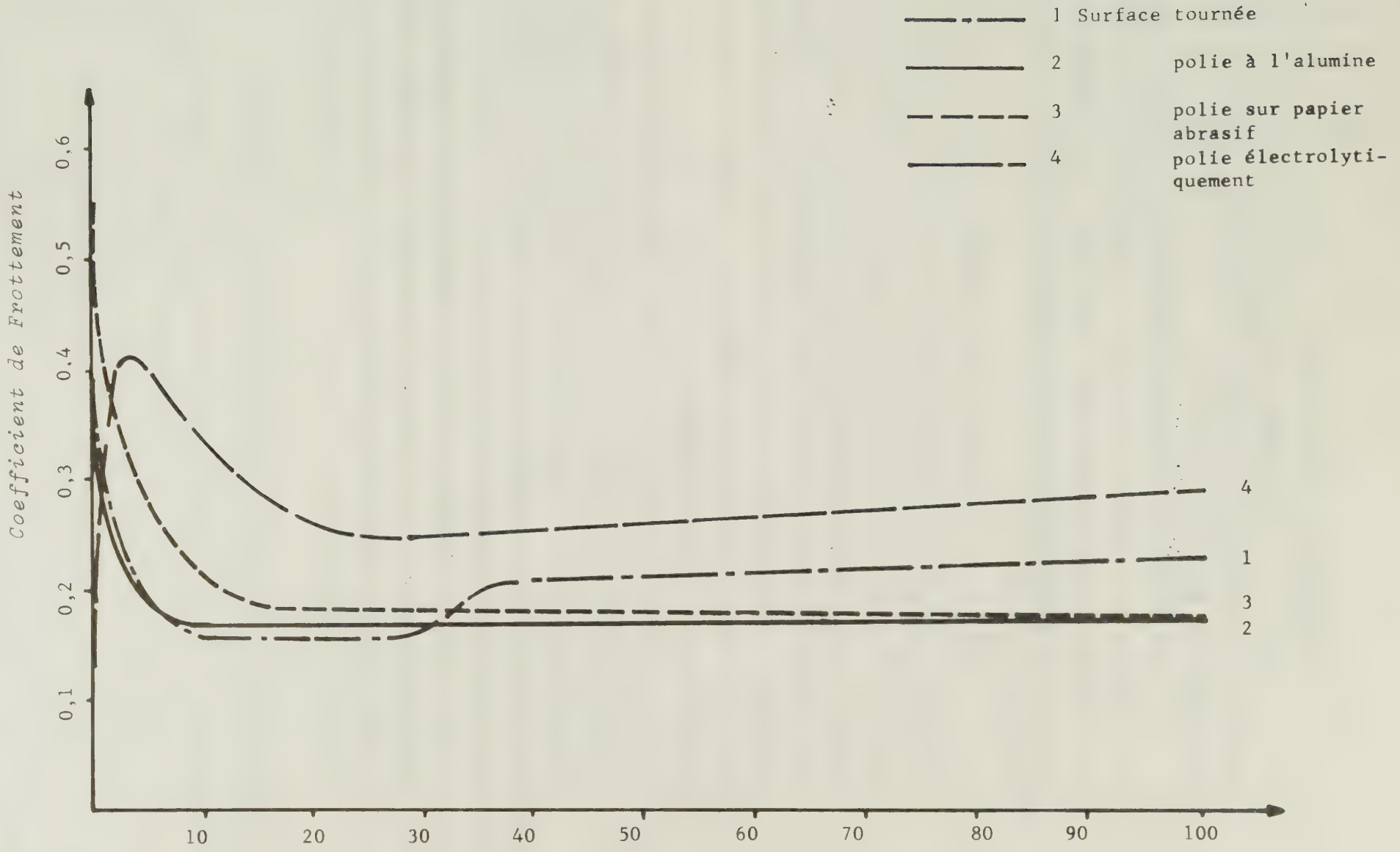

1 Surface tournée
2 polie à l'alumine
3 polie sur papier abrasif
4 polie électrolytiquement
Coefficient de Frottement
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
Passages successifs d'un point du plan sous le frotteur

Fig. 109

I - 1 - 3 Interprétation des résultats

Dans le cas de la surface préparée par tournage, on retrouve des résultats analogues à ceux présentés dans le premier chapitre. On reconnaît l'existence des phases 1, 2, 3.

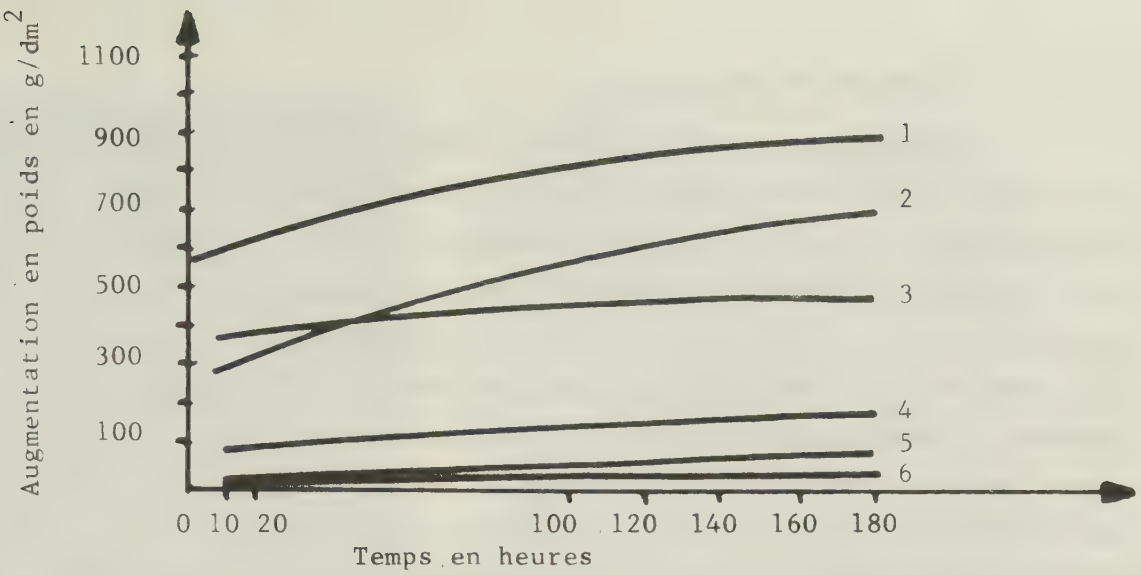
Dans le cas de l'échantillon préparé par polissage à l'alumine on ne voit que les phases 1 et 2. Dans les conditions d'essai on n'observe pas de destruction de la surface de l'échantillon d'aluminium et par suite on ne constate pas le passage à la 3ème phase, même après plusieurs centaines de rotations.

Dans le cas du polissage électrolytique on observe un accroissement de la force de frottement au cours du second passage. La surface de l'échantillon d'aluminium est détruite dès le début du mouvement. Seule la phase 3 est visible. La décroissance du coefficient de frottement après 5 passages ne doit pas faire illusion, en effet dès que les surfaces en contact sont détruites plusieurs processus peuvent intervenir. En particulier des particules d'aluminium présentent dans l'huile peuvent rouler entre les surfaces en contact, et provoquer quand elles sont en nombre suffisant une diminution de la force de frottement.

La première hypothèse qui vient à l'esprit pour interpréter ces résultats en apparence un peu incohérents, et cependant absolument reproductibles, c'est que l'oxydation de l'échantillon d'aluminium, dont on soupçonne l'importance d'après ce qui précède, doit être nettement différente dans les 4 cas considérés, bien que les données d'exposition à haute température soient identiques.

En effet d'après des résultats extraits de la littérature [18] le gain de poids au cours du temps d'un échantillon d'aluminium soumis à l'oxydation dépend de la préparation des surfaces. Les courbes de la figure 11a illustrent le point de vue.

.../...



1 - Meulé sous kérosène au papier émeri 00 et 000
2 - Meulé à sec au papier émeri 0 et 00
3 - Meulé sous kérosène au papier émeri 0 et 00
4 - Gratté bossage à sec
5 - Gratté bossage sous kérosène
6 - Polissage chimique

Fig. 110 d'après [181]

Ces courbes montrent que dans le cas du polissage chimique le gain de poids est beaucoup plus faible que dans le cas des surfaces préparées par polissage mécanique. Les propriétés des couches d'oxyde, protégeant l'aluminium de l'adhésion sur l'acier, dépendent des processus de préparation des surfaces, ce qui explique les résultats obtenus.

Pour éclaircir cette question essentielle pour la compréhension et les applications éventuelles du phénomène nous allons procéder à des expériences où l'influence de l'état de surface géométrique avant traitement thermique sera éliminée. Pour cela on utilisera le polissage électrolytique en bain Jacquet (77). Les seules variables seront la durée et la température d'oxydation.

I - 2 Surfaces préparées par polissage électrolytique en bain Jacquet

Cette série d'expériences a été effectuée à l'aide du dispositif expérimental n° 2. Les échantillons d'aluminium ont été oxydés par voie thermique et par oxydation anodique.

I - 2 - 1 Echantillons oxydés par voie thermique

Les études présentées ci-après concernent le coefficient de frottement et les états de surface, après frottement des échantillons d'aluminium et des frotteurs en acier.

I - 2 - 1 Préparation des surfaces

Nous avons vu dans le premier chapitre qu'il existe sur la surface de l'échantillon d'aluminium, une couche d'alumine partiellement cristallisée En annexe nous présentons une bibliographie traitant de l'oxydation thermique de l'aluminium. D'après de nombreux auteurs l'épaisseur de la couche d'alumine amorphe et le taux de cristallisation dépendent de la température de traitement et de la durée de maintien des échantillons en température. C'est pourquoi le traitement thermique consiste à placer les pièces pendant des durées variables dans un four aéré. Après le polissage électrolytique qui a duré 20 minutes, on a choisi d'essayer les échantillons d'aluminium dans les conditions suivantes, correspondant à différents états d'oxydation.

Echantillon n° 1 - recuit avant polissage électrolytique et essayé immédiatement après polissage.

Echantillon n° 2 - après polissage recuit 20 heures à 300° C

Echantillon n° 3 - après polissage recuit 1 heure à 600° C

Echantillon n° 4 - après polissage recuit 1 heure 30 à 600° C

Echantillon n° 5 - après polissage recuit 2 heures à 600° C

Echantillon n° 6 - après polissage recuit 2 heures à 600° C

Echantillon n° 7 - après polissage recuit 5 heures à 600° C

Echantillon n° 8 - après polissage recuit 20 heures à 600° C

après recuit les échantillons 4, 5, 6, 7, 8, prennent une teinte bleutée.

Pour préciser ces états d'oxydation nous avons préparé des éprouvettes selon les processus suivis pour les échantillons d'aluminium destinés au frottement. Polissage et traitements thermiques sont effectués dans des conditions identiques (même durée de traitement et même four).

Les couches d'alumine ont été étudiées par les techniques de micrographie électronique et d'ellipsométrie.

Les photographies obtenues au cours de l'examen par transmission électronique sont montrées sur les planches 26 et 27.

On peut faire les remarques suivantes :

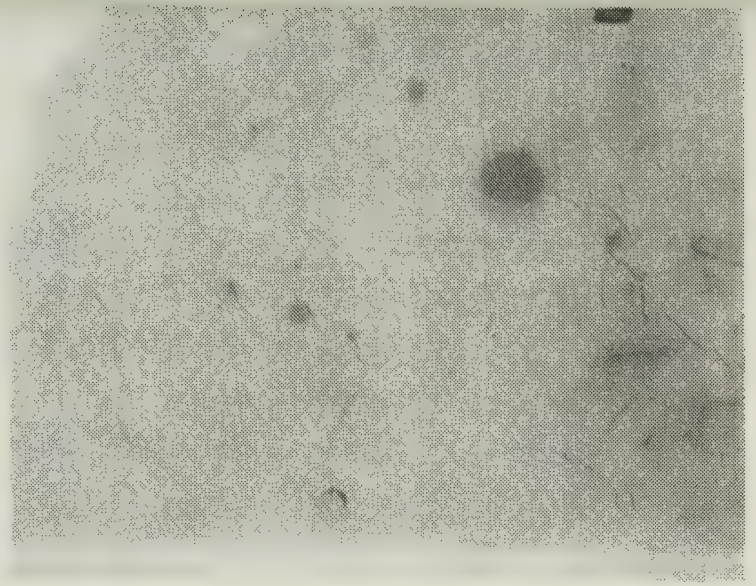
Eprouvette n° 1 : Elle est recouverte d'une couche d'alumine amorphe.

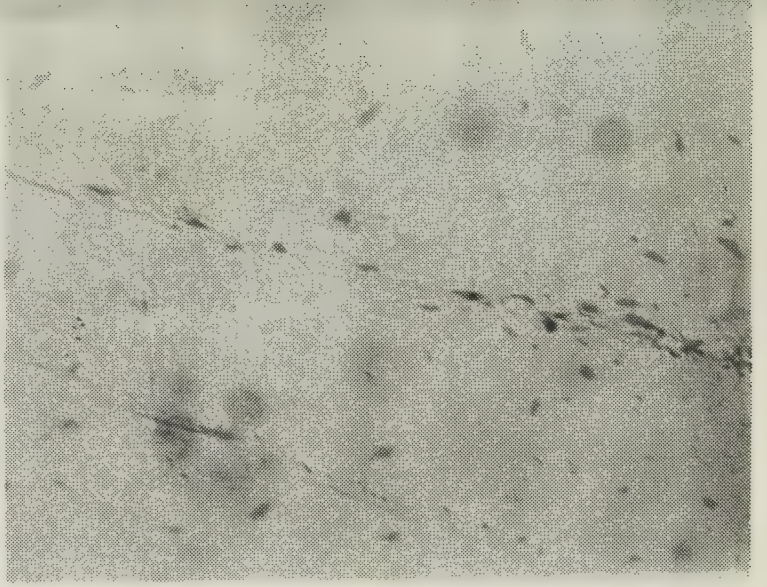
Eprouvette n° 2 : Recouverte d'une couche d'alumine amorphe, elle conserve après traitement thermique l'aspect brillant qu'elle avait avant le polissage électrolytique.

Eprouvettes n° 3 à 8 : On note la présence de grains d'alumine cristallisée apparaissant en noir sur un fond gris. Le taux de cristallisation augmente avec la durée de maintien de l'éprouvette à 600° C. Dans le cas de l'échantillon n° 8 la couche d'oxyde est constituée principalement d'alumine cristallisée.

n 1

x 5000



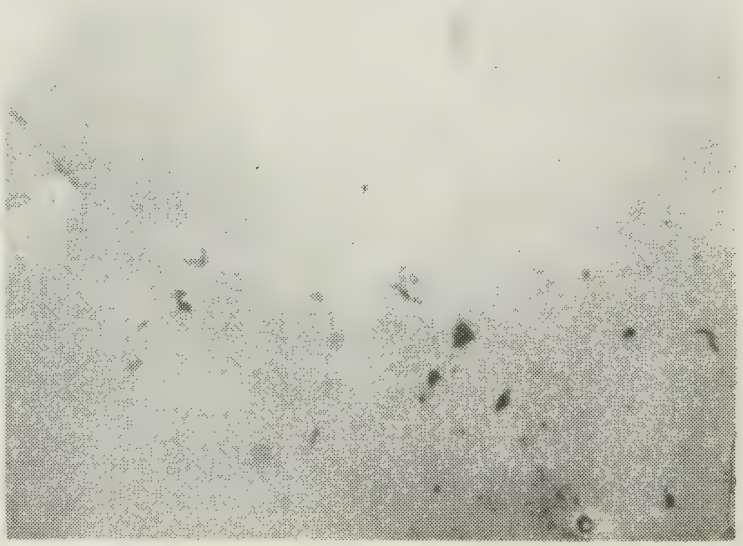


n° 2

x 18000

n 3

x 5000



n 4

x 5000

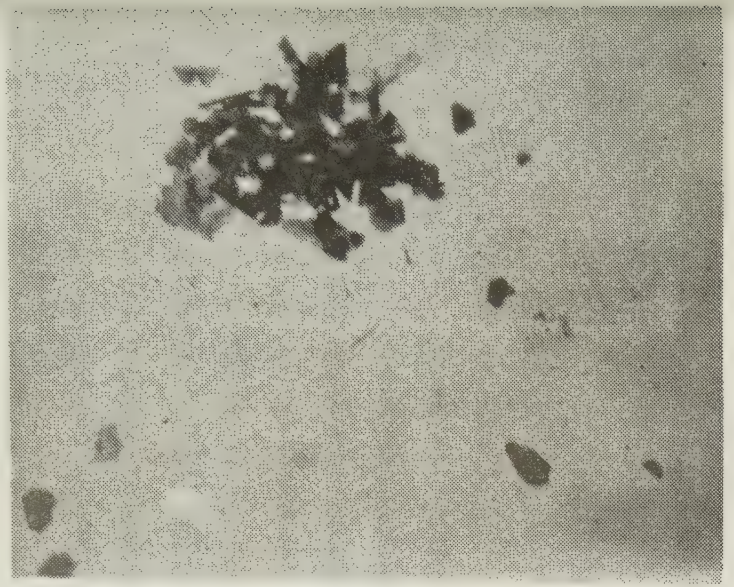
Micrographies électroniques de l'oxyde d'aluminium

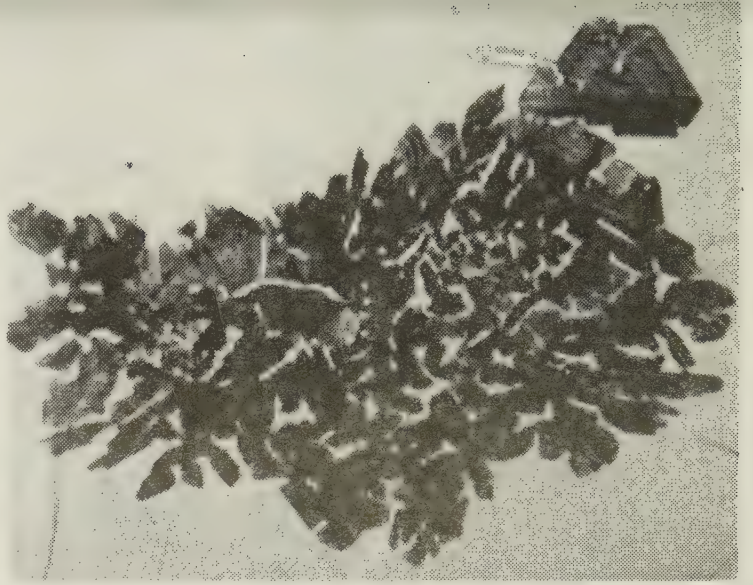
Les échantillons ayant subi différents traitements thermiques

Planche 26

n° 5

x 20000



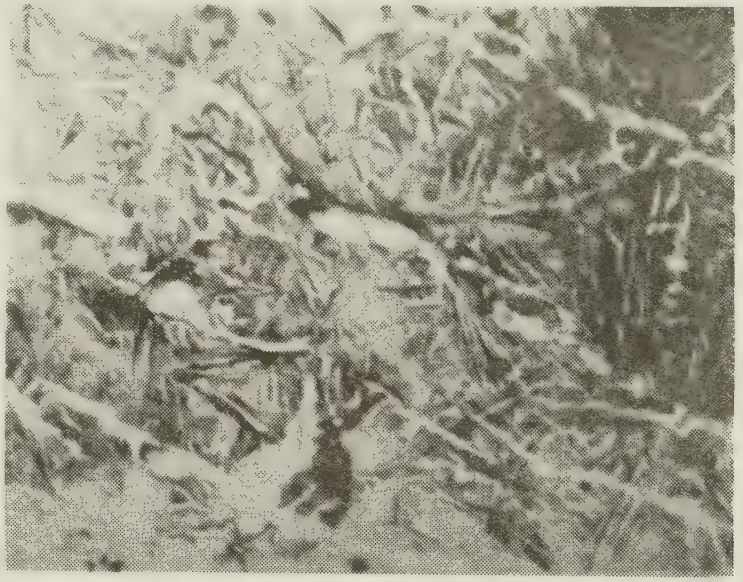


n° 6

x 20000

n° 7

x 5000



n° 8

x 5000

Micrographies électroniques de l'oxyde d'aluminium

Les échantillons ayant séjournés n° 5, 2 h 30 à 600° C - n° 6, 3 h à 600° C

n° 7, 5 h à à 600° C - n° 8, 20 h à 600° C

Planche 27

L'épaisseur de la couche d'oxyde recouvrant la surface des éprouvettes d'aluminium a été mesurée par des techniques d'ellipsométrie. Les résultats des mesures sont indiqués sur le tableau 19.

N° des éprouvettes	1	2	3	4	5	6	7	8
Epaisseurs en Å	25 à 30	35 à 40	100	150	180	200	200	700

Epaisseur de la couche d'aluminium en fonction des conditions de traitements thermiques des éprouvettes

Tableau 19

Ces résultats sont en bon accord avec ceux obtenus par les différents auteurs (111) à (116) dont les principaux résultats sont résumés dans la bibliographie présentée en annexe.

I- 2 - 1 - 2 Conditions initiales

- Contact : le frotteur est une bille sphérique de 5 mm de diamètre
- Ambiance : huile de vaseline
- Charges : 0,5 ; 1 ; 2 ; 4 ; 5 da N selon l'état d'oxydation de l'éprouvette étudiée.
- Vitesse : 5 mm/s
- Matériaux : les billes sont en acier à roulement 100 C 6
  l'aluminium est de nuance A 5

Les billes sont utilisées sans polissage préalable.

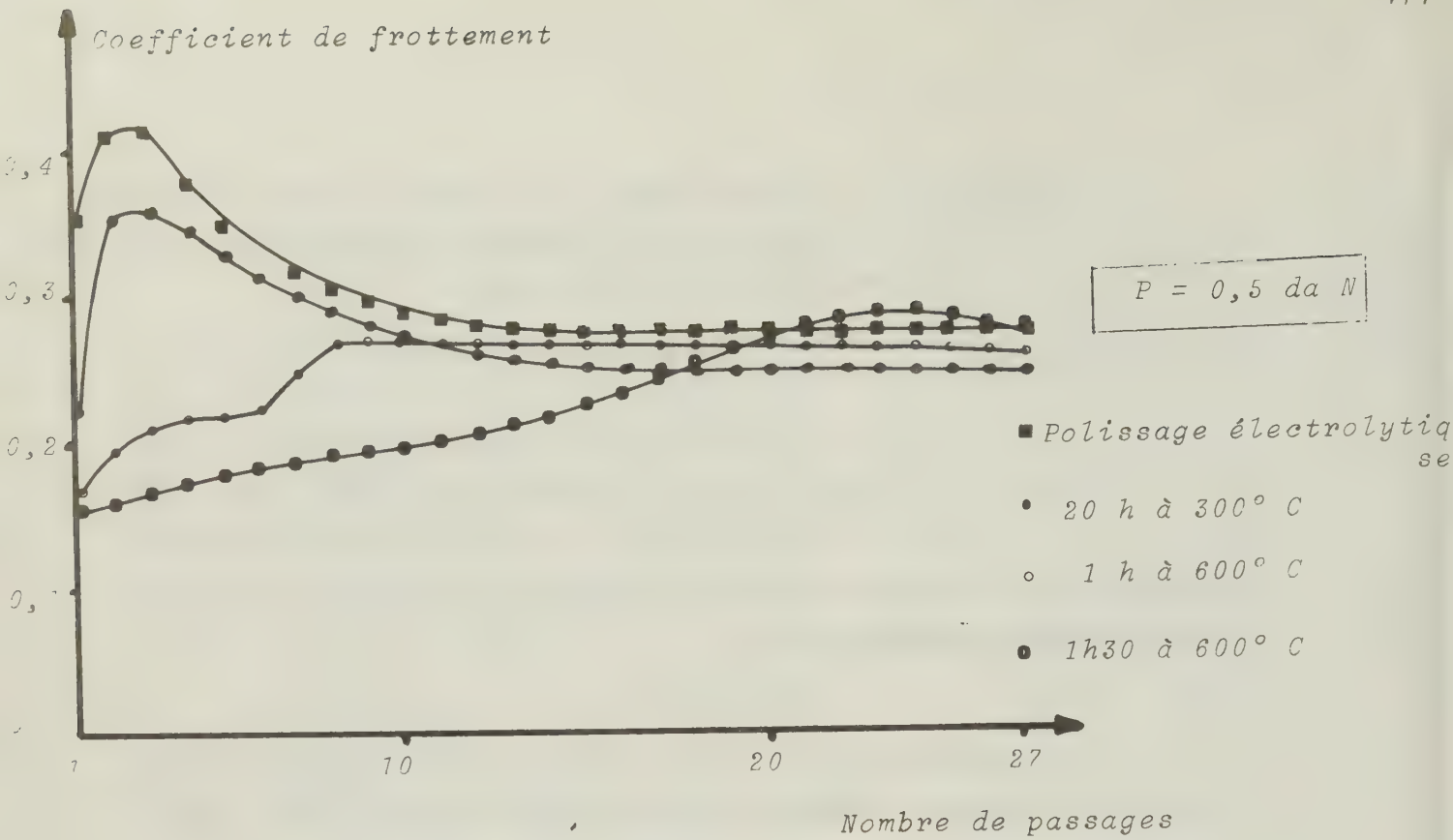
Le processus d'obtention des états de surface des échantillons d'aluminium a été précisé dans le paragraphe précédent.

Le glissement de la bille d'acier sur l'échantillon d'aluminium dure 1 heure.

I - 2 - 1 - 3 Variation du coefficient de frottement au cours du temps

Les valeurs numériques jusqu'au 27 ème passage présentées dans les tableaux 20 et 21 annexe 1 ont permis de tracer les courbes des figures 111(1 à 5).

.../...


Coefficient de frottement
0,4
0,3
0,2
0,1
1
10
20
27
Nombre de passages
P = 0,5 da N
Polissage électrolytiq
se
20 h à 300° C
1 h à 600° C
1h30 à 600° C

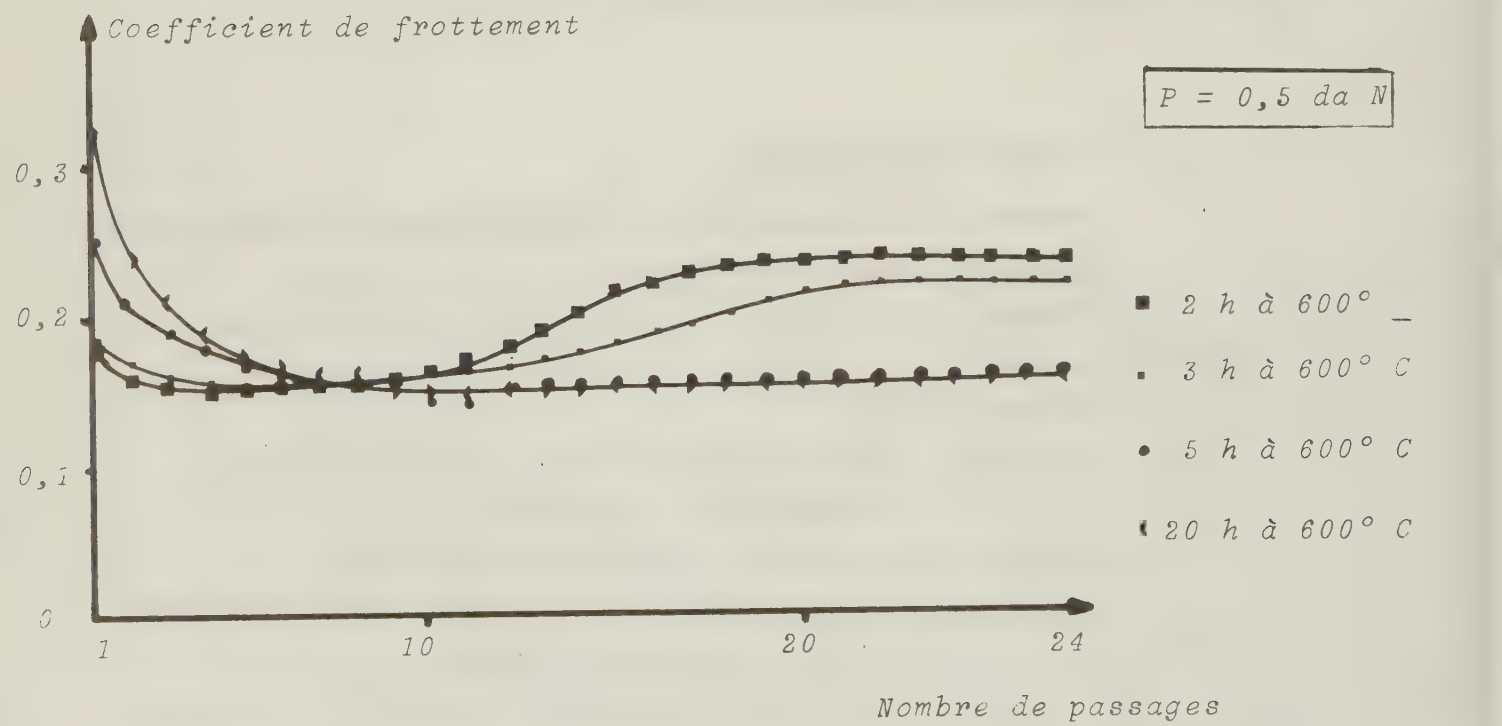
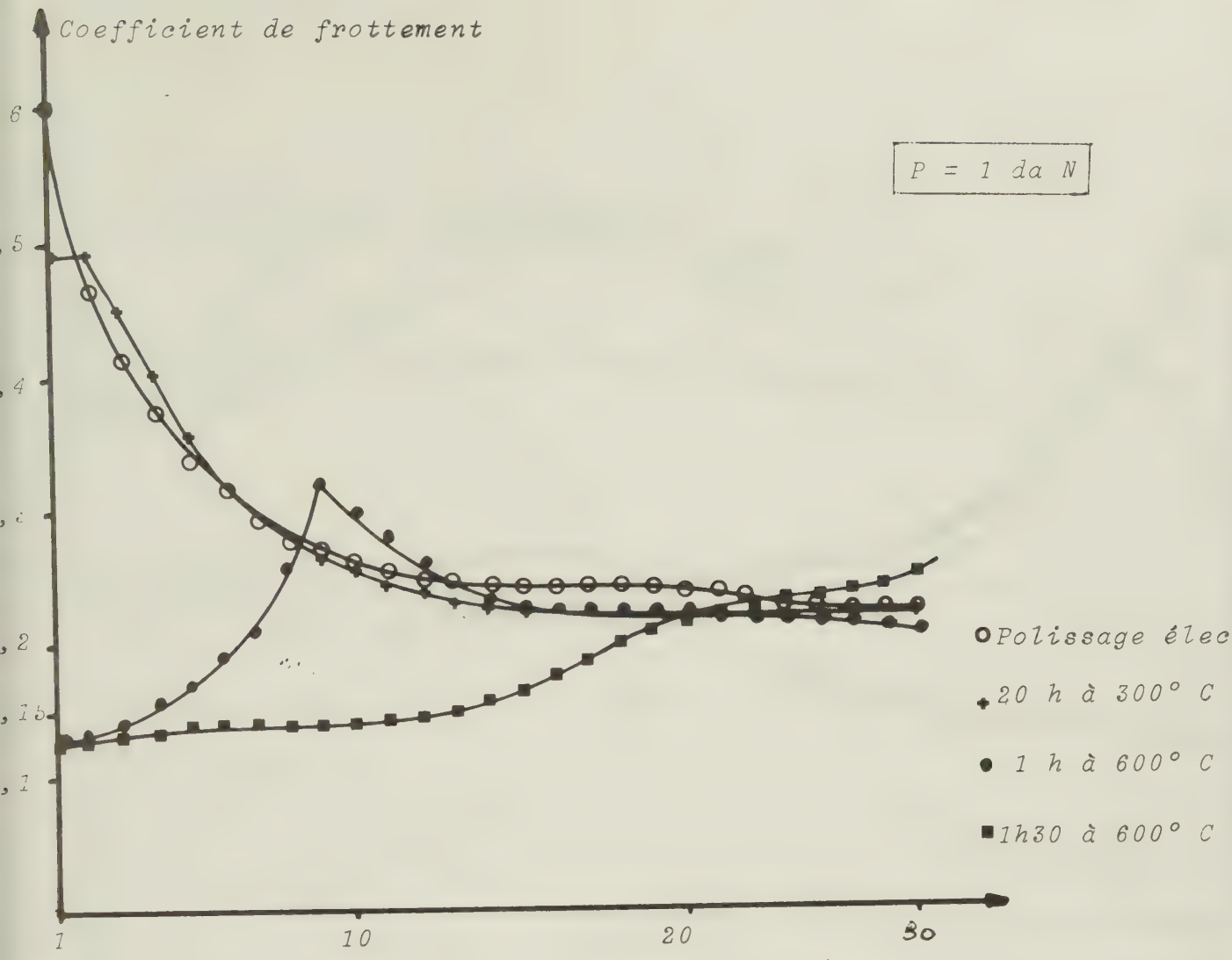

Coefficient de frottement
0,3
0,2
0,1
0
1
10
20
24
Nombre de passages
P = 0,5 da N
2 h à 600° C
3 h à 600° C
5 h à 600° C
20 h à 600° C

Fig. 111 - 1


Coefficient de frottement
P = 1 da N
Polissage élect. seul
20 h à 300° C
1 h à 600° C
1h30 à 600° C
1
10
20
30
Nombre de passages

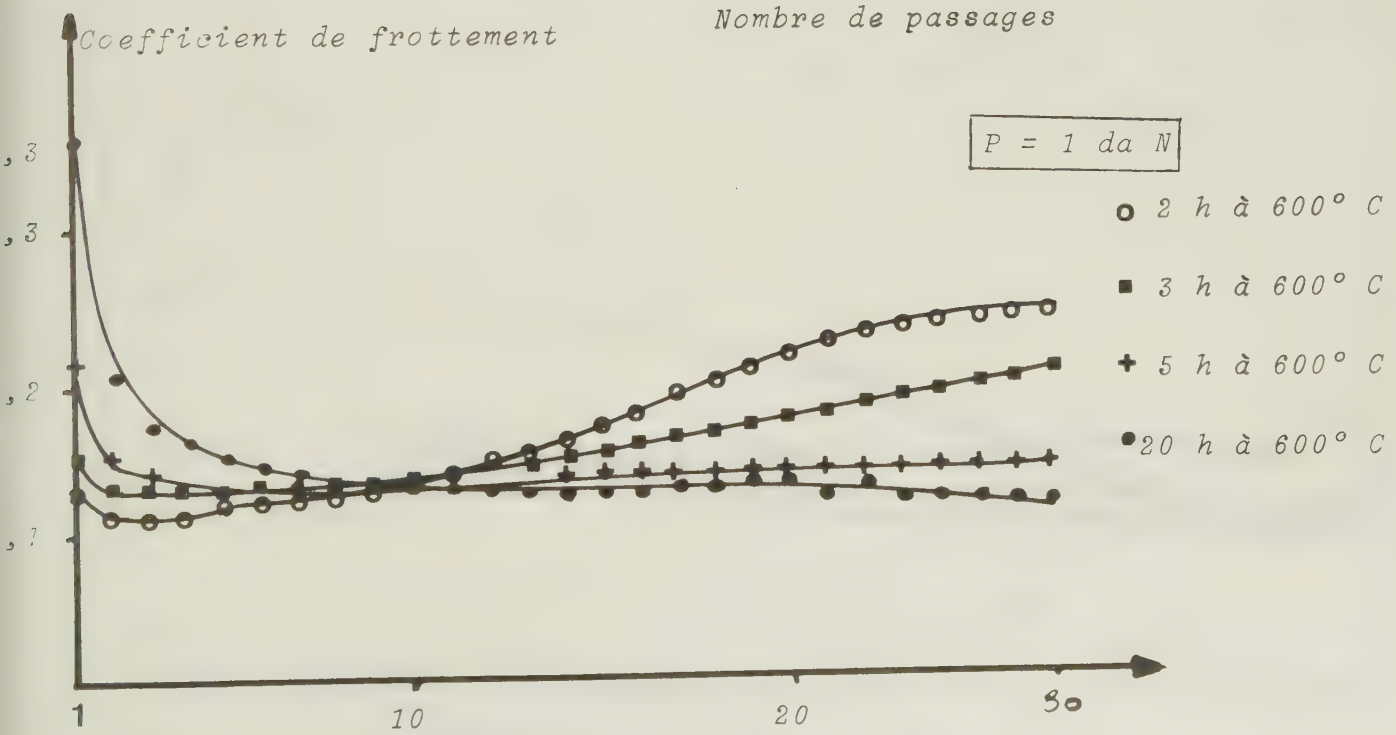
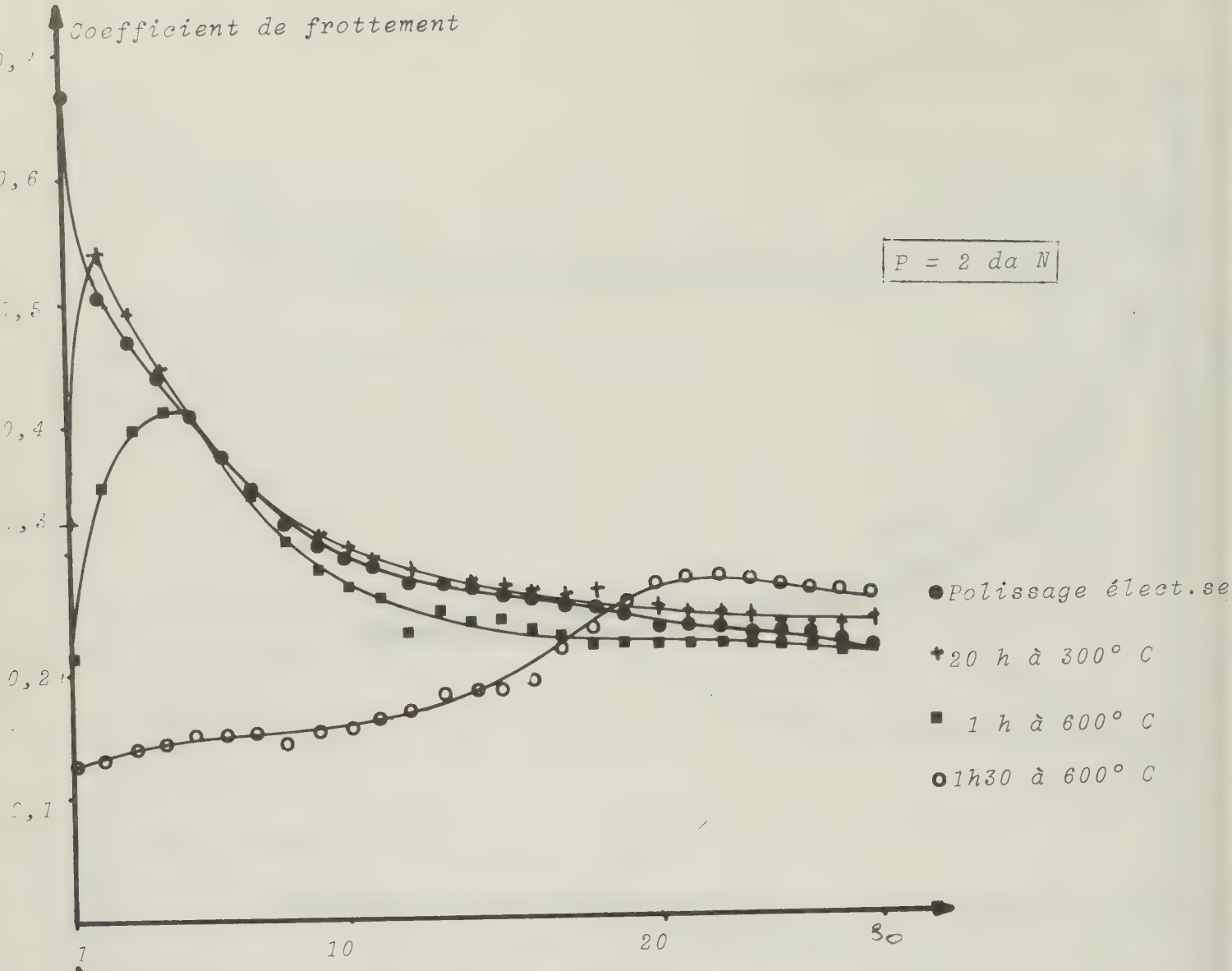

Coefficient de frottement
P = 1 da N
2 h à 600° C
3 h à 600° C
5 h à 600° C
20 h à 600° C
1
10
20
30
Nombre de passages

Fig. III-2


Coefficient de frottement
P = 2 da N
Polissage élect.se
20 h à 300° C
1 h à 600° C
1h30 à 600° C
1
10
20
30
Nombre de passages

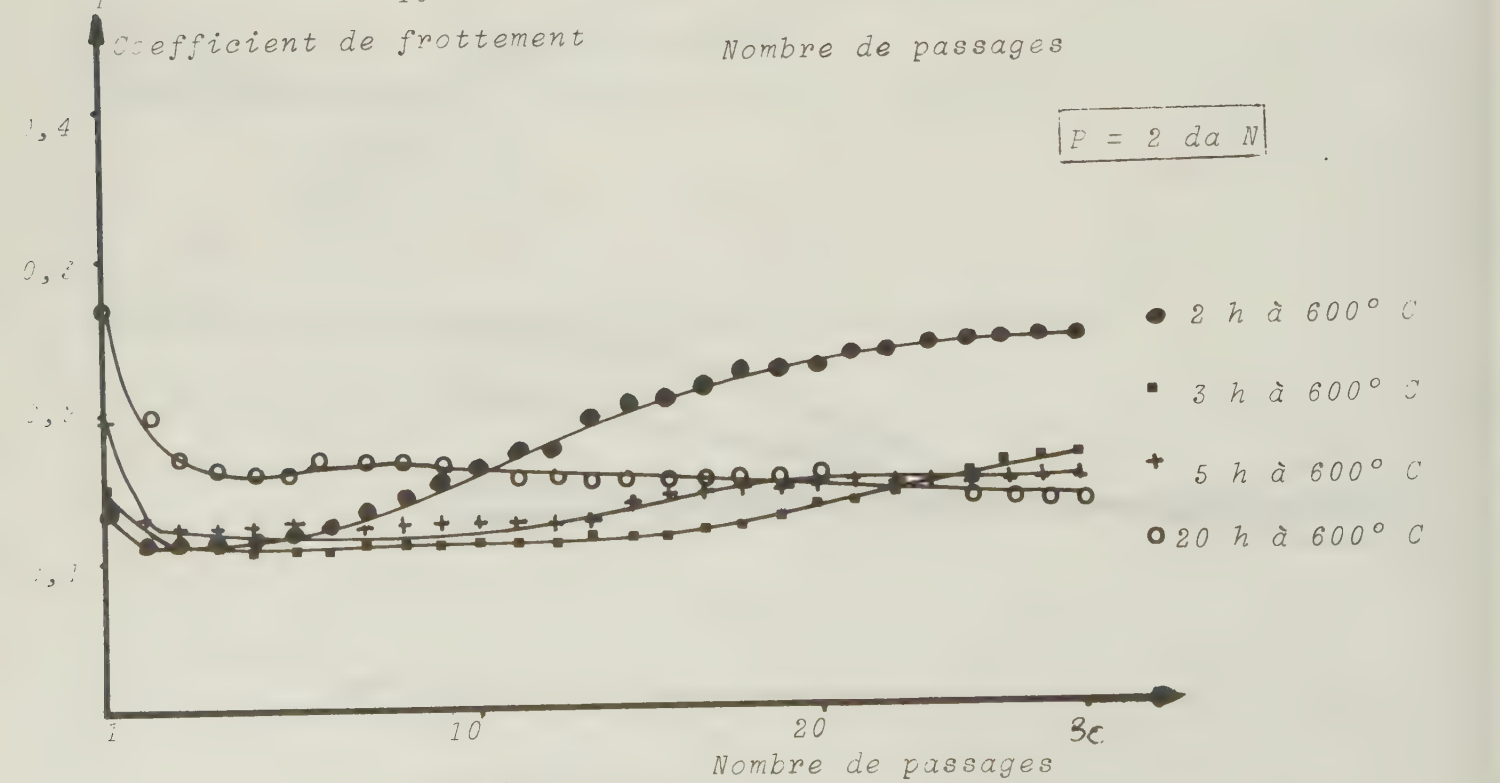

Coefficient de frottement
P = 2 da N
2 h à 600° C
3 h à 600° C
5 h à 600° C
20 h à 600° C
1
10
20
30
Nombre de passages

Fig.-111-3

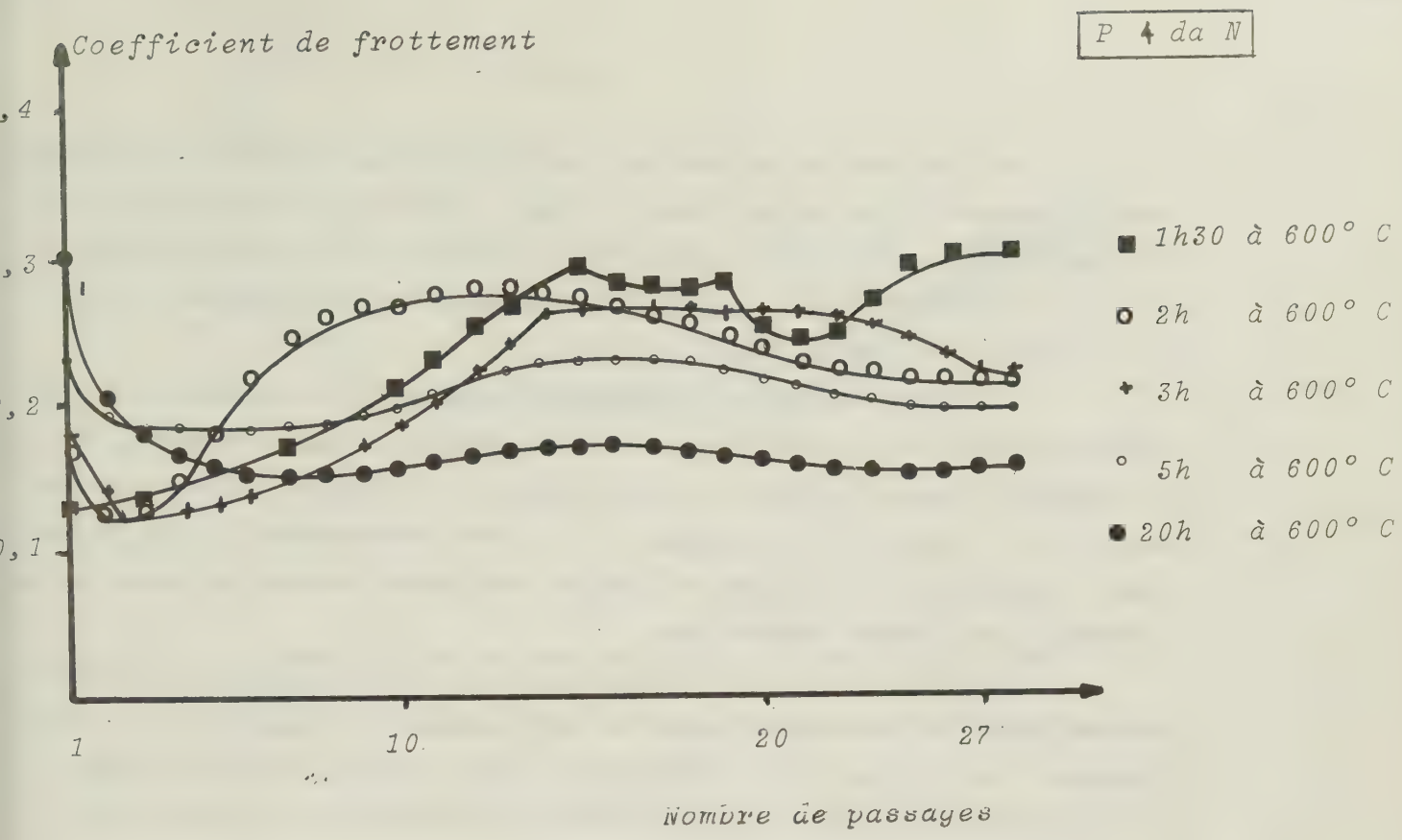


Fig. 52-4

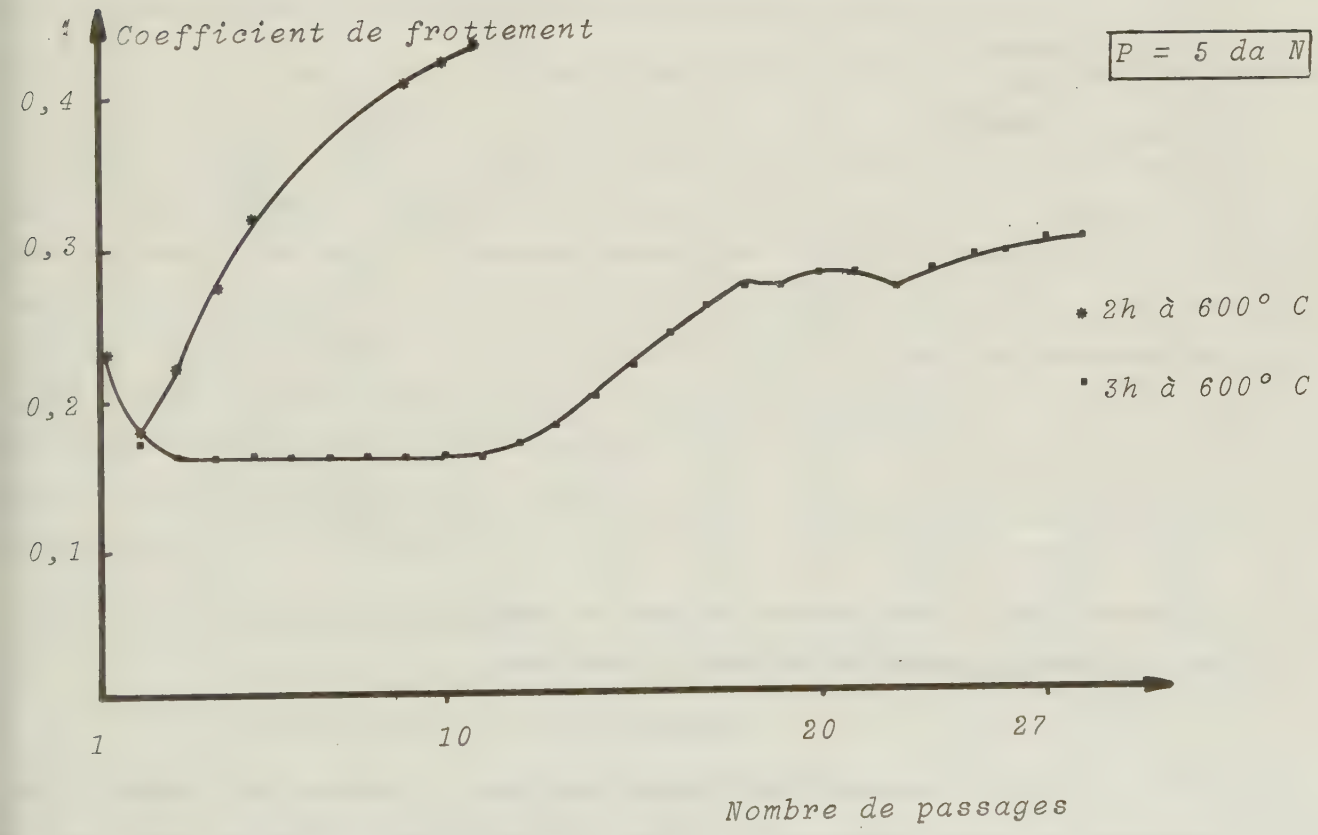


Fig. 53-5

Sur ces courbes on voit que pour les charges étudiées la deuxième phase n'apparaît qu'après un temps de recuit à 600° C au moins égal à 2 h. Pour des durées inférieures la pente de la courbe à l'origine est positive et il y a destruction de la surface de l'échantillon dès le premier tour. Il y a donc un état d'oxydation critique.

Cet état d'oxydation critique se traduit par l'augmentation d'un minimum atteint par le coefficient de frottement au cours du premier passage. Le tableau 22 donne la valeur du coefficient de frottement au cours du premier tour en fonction de la charge et de l'état d'oxydation du plan d'aluminium. L'épaisseur de la couche d'alumine croît avec la durée de maintien de l'échantillon à haute température.

On voit donc que le Coefficient de frottement pendant le premier passage passe par un minimum quand on fait croître l'épaisseur de la couche d'alumine. Ce résultat qui est classique quand un métal recouvre un métal dur est trouvé ici pour le cas d'un oxyde dur (2000 HV) sur un métal mou (25 HV), mais en présence d'un lubrifiant.

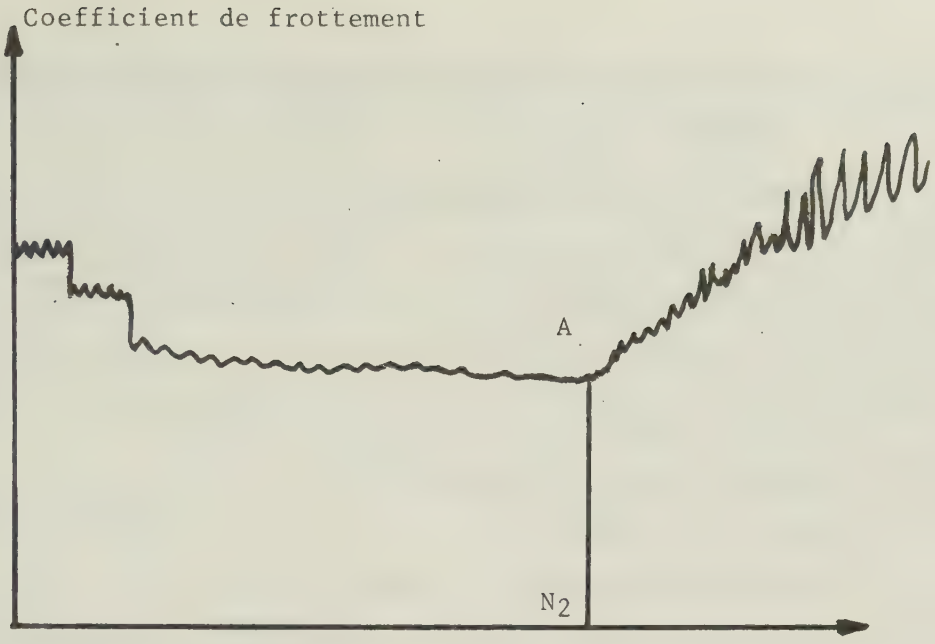
N° de l'échantillon Charge en daN	1	2	3	4	5	6	7	8
0,5	0,35	0,22	0,17	0,15	0,17	0,20	0,27	0,33
1	0,6	0,49	0,14	0,12	0,13	0,15	0,22	0,36
2	0,67	0,32	0,21	0,12	0,13	0,14	0,20	0,26
4				0,13	0,16	0,18	0,23	0,30

Valeur du coefficient pendant le premier passage en fonction de la charge et de l'état d'oxydation du plan d'aluminium.

Tableau 22

Dans le domaine des charges étudiées, le facteur déterminant l'apparition des trois phases est l'oxydation thermique. La charge intervient surtout pour limiter la durée de la deuxième phase qui peut être définie par l'intersection A de la partie horizontale et de la partie ascendante de la courbe $f = g(N)$. Appelons N_2 l'abscisse de A. Ces rotations sont indiquées sur la figure 112

.../...



Nombre de passages d'un point du plan d'aluminium sous le frotteur

Fig 112

Le tableau 23 donne les valeurs de N_2 pour un état d'oxydation et une charge déterminés.

N° des échantillons / Charge en da N	1	2	3	4	5	6	7	8
0,5	0	0	0	1	7	11	28	> 60
1	0	0	0	1	7	8	26	> 60
2	0	0	0	1	5	14	13	> 60
4				1	2	5	6	8

Nombre de rotations de l'échantillon d'aluminium avant apparition de la 3ème phase pour un état d'oxydation et une charge déterminés.

Tableau 23

La durée de la deuxième phase croît avec la durée de maintien de l'échantillon à haute température et diminue avec la charge.

Ces résultats vont être complétés par la mesure de la résistance de contact et l'étude des surfaces des échantillons d'aluminium et des frotteurs en acier.

.../...

I - 2 - 1 - 4 Mesure de la résistance de contact au cours des premiers passages

On a mesuré au cours du mouvement alternatif la résistance de contact sur les échantillons 1, 2, 5, 7. Sur les deux premiers il y a une mince couche d'alumine amorphe. Sur les deux derniers l'alumine est plus épaisse et est partiellement cristallisée.

Conditions initiales :

- Mode de contact : bille Ø 10 mm .
- Ambiance : huile de vaseline
- Charge : 2,16 da N
- Vitesse de glissement : 1 mm/mn
- Le frotteur est en acier de nuance X C 38, durci par carbonitruration. L'aluminium est de nuance A 5, c'est-à-dire 99,5 % de pureté.

L'état de surface du frotteur avant glissement est obtenu par polissage à la pâte diamantée. Les états de surface des échantillons avant glissement ont été indiqués dans le paragraphe I - 2 - 1 - 1.

Mesure de la résistance de contact au cours des trois premiers passages.

Le tableau 24 donne les résultats des mesures effectuées lorsque le frotteur en acier a parcouru la moitié de la longueur de la trace.

N° des passages / N° des échantillons	1	2	3
1	0,6	0,6	0,9
2	1	2	2
5	100	100	20
7	100	150	50

Résistance de contact en m Ω , mesuré en milieu de trace au cours des premiers passages.

Tableau 24

Ces mesures confirment les résultats de l'étude précédente. En effet, dans le cas des échantillons 1, 2, la couche d'alumine amorphe est détruite dès le premier passage, il y a adhésion fer, aluminium, la résistance de contact est faible de l'ordre du m Ω . Dans le cas des échantillons 5, 7, la couche d'alumine n'est pas entièrement détruite, l'adhésion fer,

aluminium, si elle existe est très faible, la résistance de contact de l'ordre de 100 m Ω est 100 fois plus élevée.

I - 2 - 1 - 4 Etude des états de surface des échantillons d'aluminium

Dans cette série d'expériences la durée du glissement est de 1 heure Nous avons photographié, sur les 8 échantillons, à l'aide du microscope métallographique les traces de frottement obtenus sous une charge de 5 N. Les planches 28 et 29 montrent les photographies obtenues.

D'après le tableau 23 en fin d'essai les échantillons 1 ..... 7 sont en phase 3. Sur l'échantillon 8 après 60 rotations la phase 3 n'est pas encore apparue.

Les traces de frottement des échantillons 1, 2, 3, 4 montrent des destructions importantes. Sur les échantillons 5, 6, 7 les dommages sont moins importants et la largeur de la trace en fin d'essai est plus faible. Sur l'échantillon n° 8 l'état de surface de la trace de frottement paraît intact, les seuls endommagements observables sont des rayures parallèles à la direction du glissement.

On a mesuré les largeurs de trace en fin d'essai par la méthode de la coupe optique de Schmaltz . Les résultats des mesures sont donnés dans le tableau 25

Charges N° des échantillons	5 N	10 N	20 N	40 N
1	0,63	0,82	0,95	
2	0,58	0,76	1,03	
3	0,61	0,83	1,03	
4	0,60	0,76	1	1,43
5	0,51	0,76	1,04	1,36
6	0,42	0,69	0,95	1,23
7	0,4	0,61	0,8	1,25
8	0,25	0,41	0,54	1,12

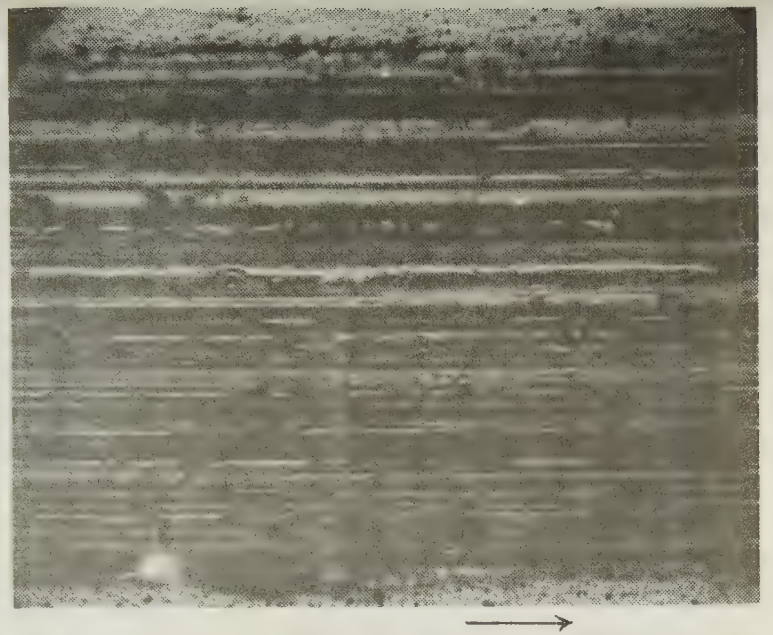
Largeur de trace en mm en fonction d'une charge et d'un état d'oxydation déterminés.

Tableau 25

.../...

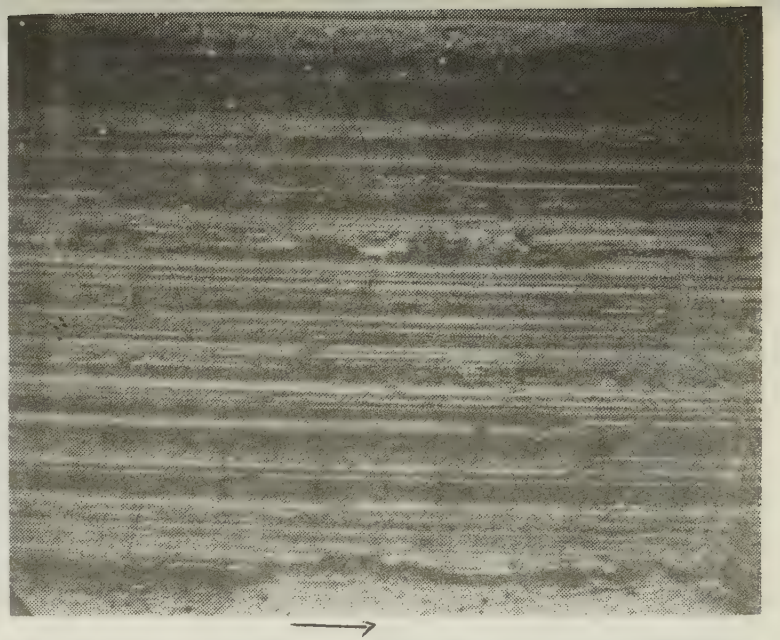
3

x 140



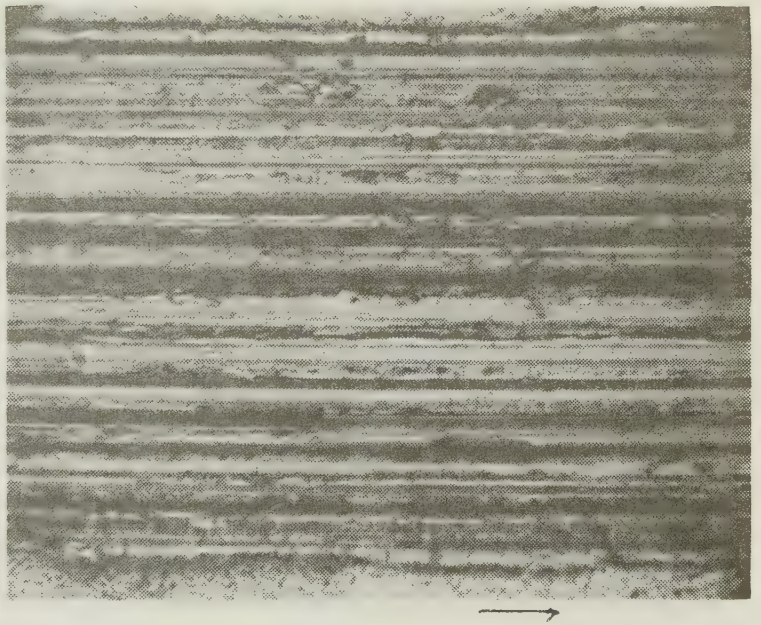
1

x 140



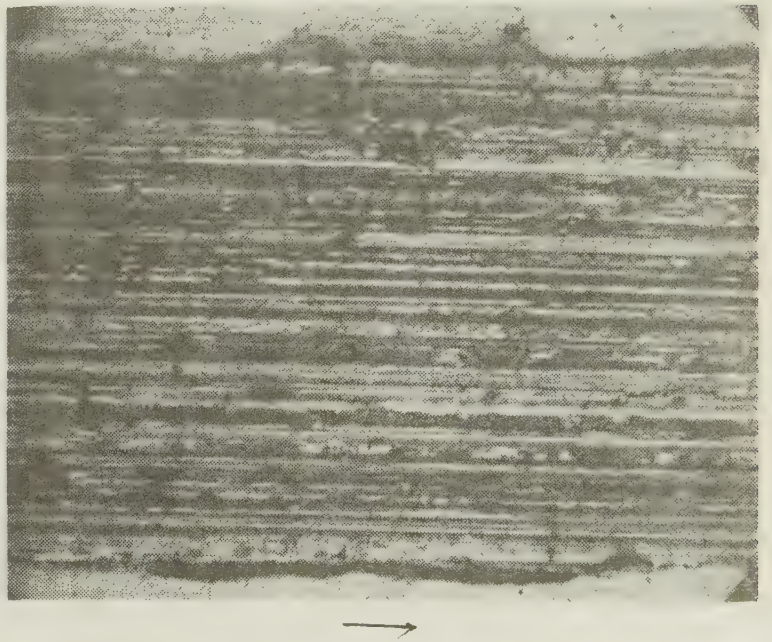
4

x 140



2

x 140



Etats de surface des échantillons d'aluminium n° 1, 2, 3, 4 après 60 passages

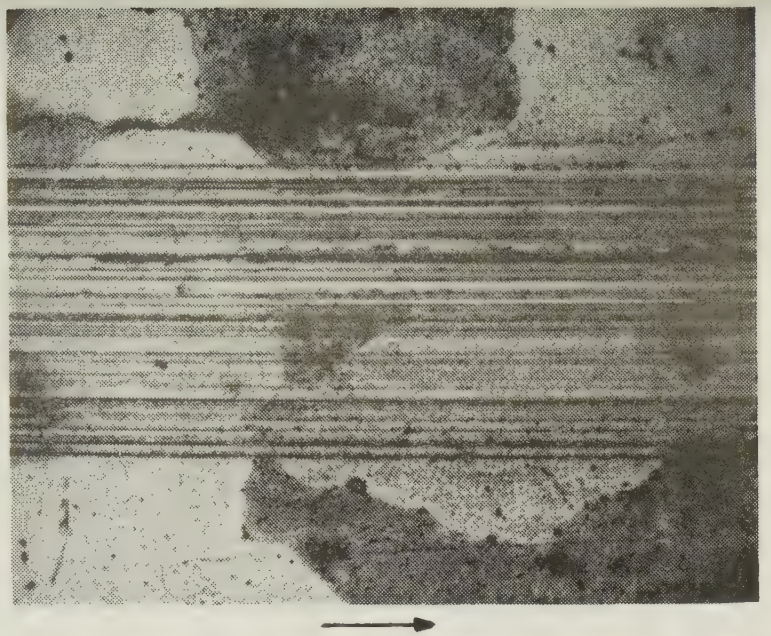
sous une charge de 5 N

Les flèches indiquent la direction du déplacement

Planche 28

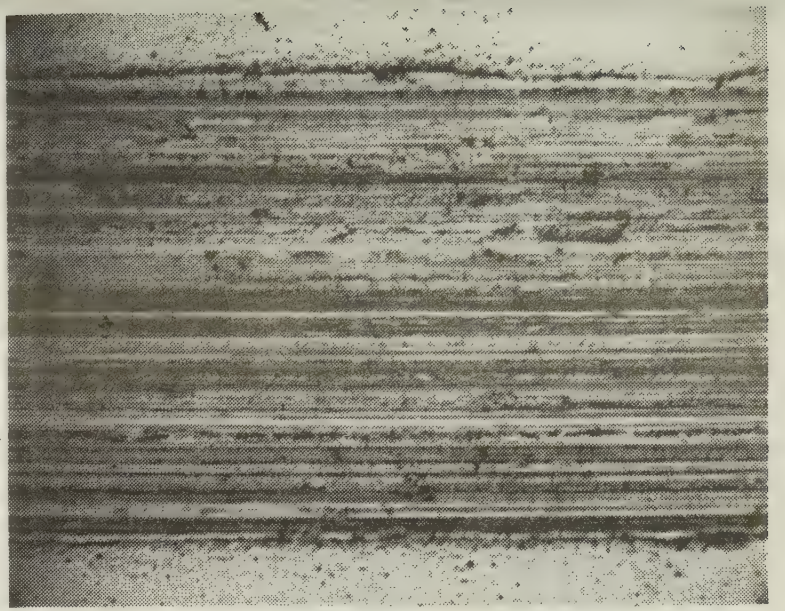
7

x 140



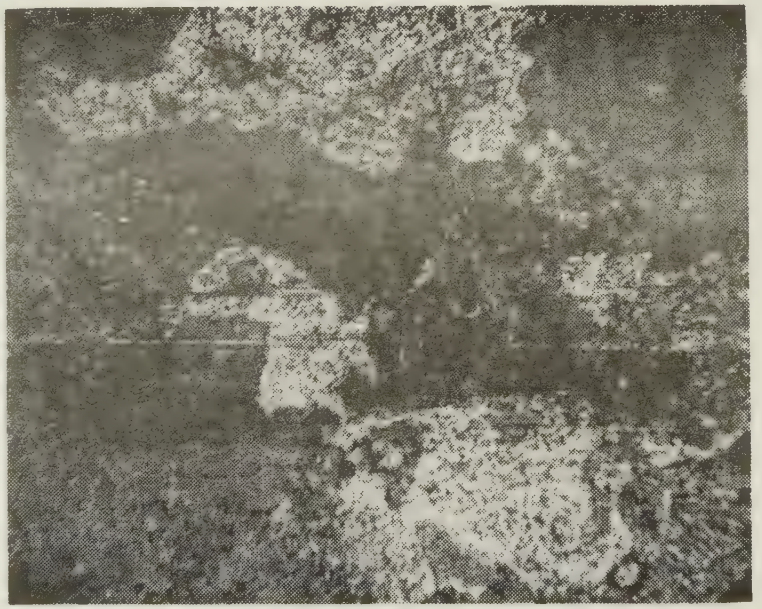
5

x 140



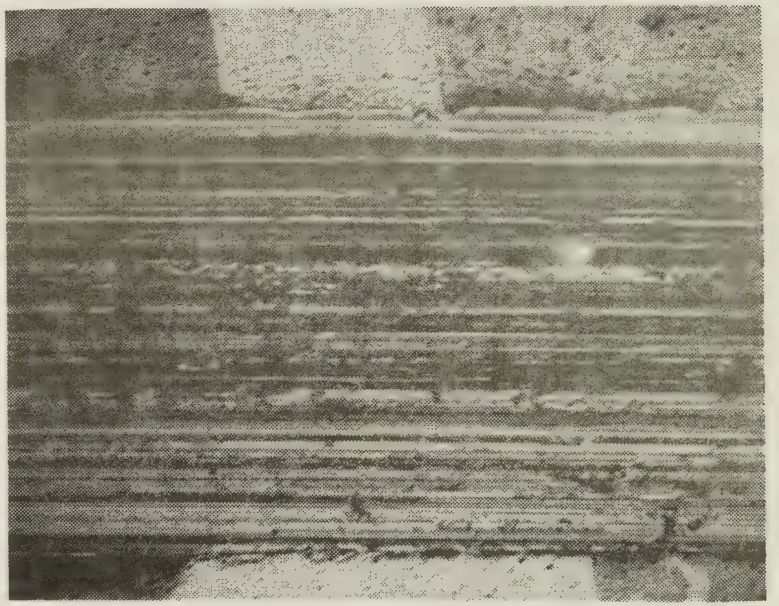
8

x 140



6

x 140



Etats de surface des échantillons d'aluminium n° 5, 6, 7, 8 après 60 passages

sous une charge de 5 N
Les flèches indiquent la direction du glissement

Planche 29

I - 2 - 1 - 6 Etats de surface des frotteurs après frottement

Nous avons photographié, sur les 8 billes, à l'aide du microscope métallographique, les zones de frottement obtenues sous une charge de 5 N. La durée de glissement est de 1 heure.

Les planches 30 et 31 montrent les photographies obtenues. Sur les billes 1 à 4 il y a des rayures nombreuses et un transfert important. Sur les billes 5, 6, 7, le transfert est moins important. Sur la bille 7 certaines zones ne sont pas encore recouvertes de particules transférées. La zone de frottement sur la bille n° 8 a un aspect poli, on observe cependant des rayures sur le bord d'attaque de la bille.

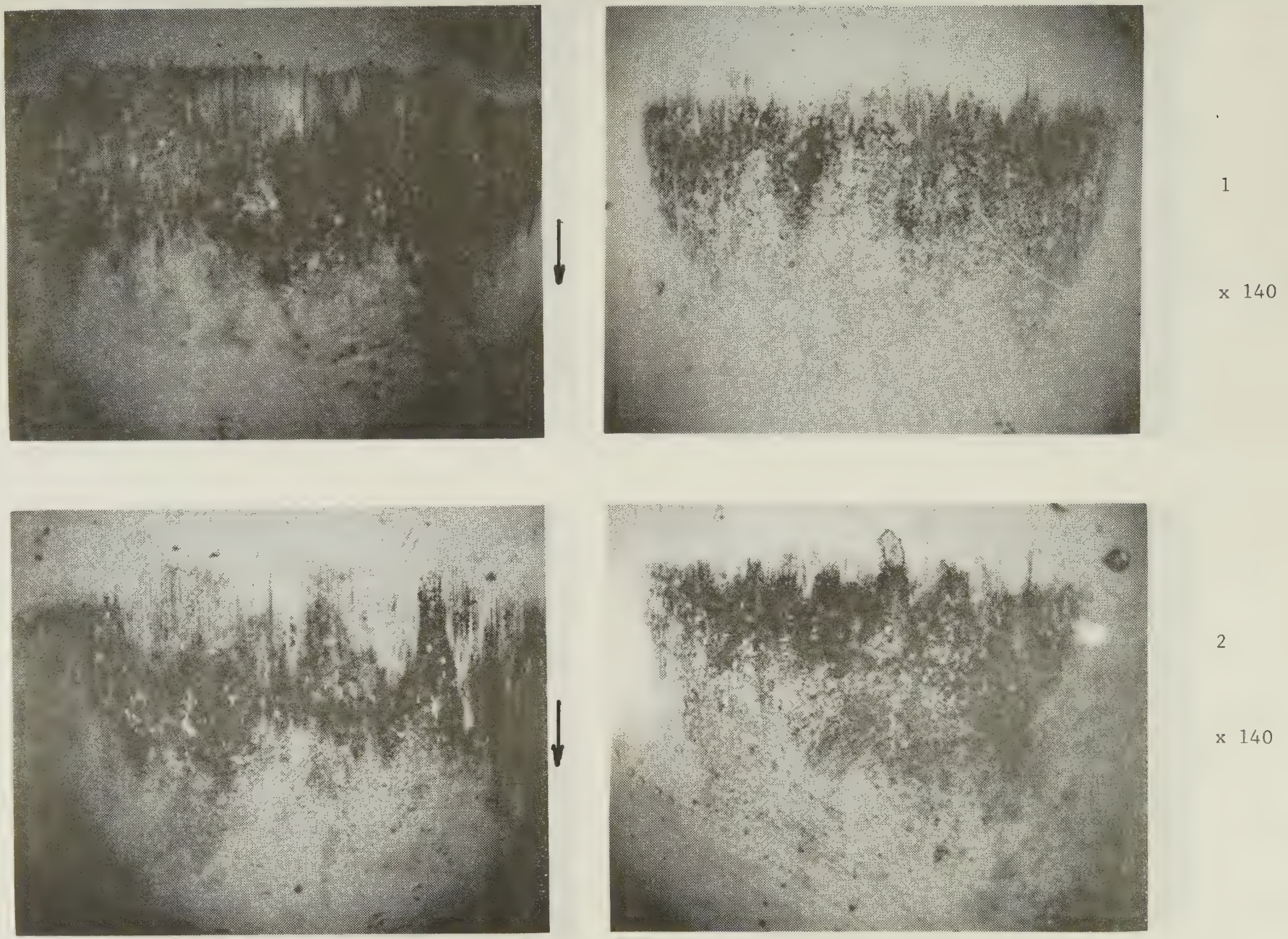
D'après le tableau 23, en fin d'essai, c'est-à-dire après 1 heure de glissement, les billes 1 .....7 glissent sur un échantillon détruit qui se trouve en phase 3. L'adhésion est le processus dominant.

La bille n° 8 glisse sur l'échantillon qui se trouve en phase 2. Le processus dominant est l'usure abrasive. La surface de la bille est polie.

On peut supposer que les phénomènes observés sont liés aux duretés relatives des matériaux en présence, on en aura confirmation plus loin quand on fera varier la nature du frotteur.

I - 2 - 1 - 7 Interprétation des résultats

On sait (annexe 1) et nous l'avons vérifié par micrographie électronique (paragraphe II - 2 - 2) que les échantillons n° 1 et 2 sont recouverts d'une mince couche d'alumine amorphe tandis que sur les autres échantillons, en fonction de la durée d'oxydation, on voit apparaître des grains d'alumine cristallisée enchassés dans l'aluminium. Quand ces grains ont atteint des dimensions suffisantes en largeur et en épaisseur, la couche d'oxyde possède une grande résistance à l'usure, et permet un écrouissage important de l'aluminium sous-jacent dès le premier passage, ce qui joue un rôle favorable lors des passages ultérieurs du frotteur en acier. Cette déformation initiale du métal se fait sans grippages superficiels à partir du moment où l'on a atteint l'état d'oxydation critique correspondant à l'apparition de trois phases successives sur le graphe de frottement. Ainsi la présence d'alumine cristallisée, obtenue par oxydation à haute température confère à l'aluminium une résistance accrue à l'usure. Un tel état d'oxydation de l'aluminium, facile à contrôler par maintien de l'échantillon à des durées données à haute température, détermine la loi de variation de la force de frottement en fonction du nombre de passages et, par la même, l'instant d'apparition des différentes phases. La charge a pour effet principal de déterminer l'instant d'apparition de la phase 3.



Etats de surface des frotteurs après glissement sur les échantillons d'aluminium

n 1, 2, 3, 4 sous une charge de 5 N
Les flèches indiquent la direction du déplacement

Planche 3c

7

x 140

5

x 140

8

x 140

6

x 140

Etats de surface des frotteurs après glissement sur les échantillons d'aluminium

n° 5, 6, 7, 8 sous une charge de 5 N

Les flèches indiquent le direction du déplacement

Planche 31

I - 2 - 2 Echantillons oxydés par voie anodique

Au cours de cette série d'expériences effectuée à l'aide du dispositif expérimental n° 2 on a mesuré la force de frottement.

I - 2 - 2 - 1 Préparation des surfaces

Le processus de préparation des surfaces comprend les opérations successives suivantes :

1°) Polissage électrolytique pendant 10 minutes

2°) Recuit dans un four à air à la température de 300° C pendant 16 heures

3°) polissage électrolytique pendant 10 minutes

4°) Oxydation anodique

Le polissage électrolytique a été effectué suivant le processus décrit dans le paragraphe II - 1. Le traitement d'anodisation est une oxydation en couches barrières(187). La croissance de la couche est de 30 Å par volts. Nous avons préparé trois échantillons. Les conditions de traitement sont indiquées si-dessous. (*)

N° de l'échantillon	Epaisseur de la couche anodique	Tension de formation
Echantillon n° 1	40 Å	3,1 volts
Echantillon n° 2	200 Å	15,5 volts
Echantillon n° 3	800 Å	62 volts

I - 2 - 2 - 2 Conditions initiales

- Contact : le frotteur est une bille sphérique de 5 mm de diamètre
- ambiance : huile de vaseline
- charges : 0,5 ; 1 da N
- vitesse : 5 mm/s
- matériaux : les billes sont en acier à roulement de nuance 100 C 6 l'aluminium est de nuance A 5

.../...

Le processus de préparation des états de surface des échantillons d'aluminium a été précisé dans le paragraphe précédent.

I - 2 - 2 - 2 Variation du coefficient de frottement au cours du temps

Les valeurs numériques jusqu'au 5ème passage présentées dans le tableau 26 ont permis de tracer les courbes des figures 113

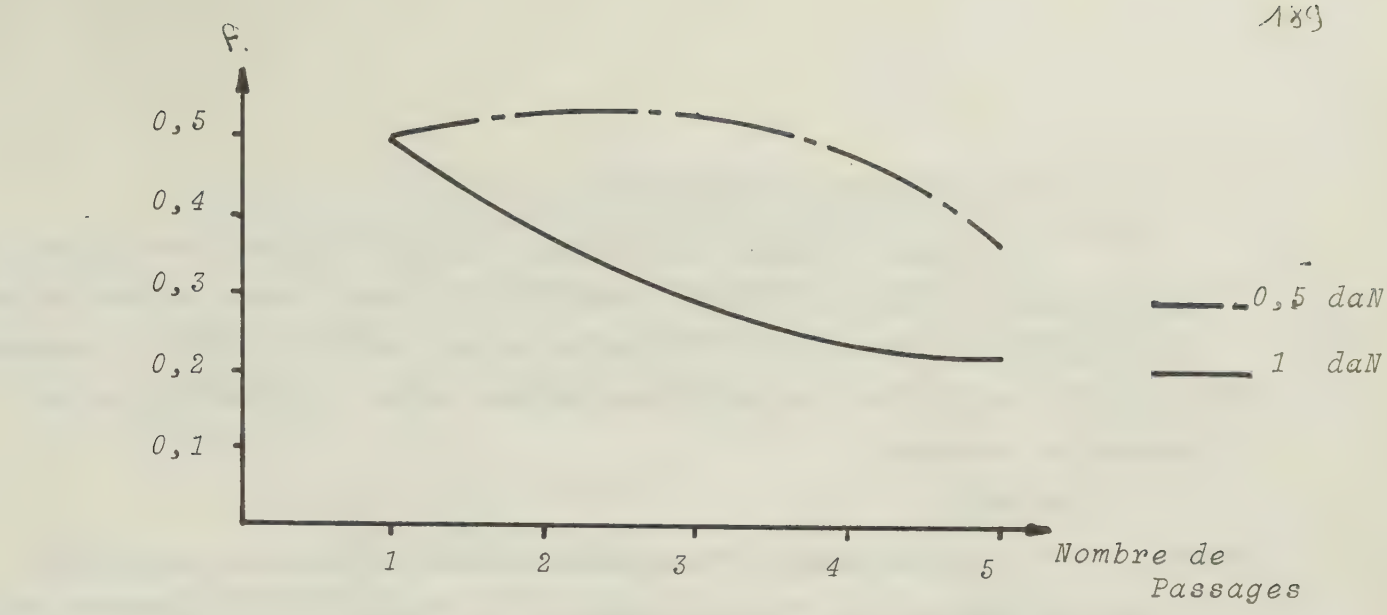
N° des échantillons \ N° des passages / charges		1	2	3	4	5	Nbre de rotations de l'échantillon avant apparition de la 3ème phase
n° 1	0,5 da N	0,50	0,53	0,54	0,47	0,37	0
	1 da N	0,50	0,36	0,31	0,26	0,23	0
n° 2	0,5 da N	0,16	0,22	0,29	0,31	0,32	1
	1 da N	0,15	0,25	0,40	0,35	0,25	1
n° 3	0,5 da N	0,16	0,16	0,16	0,17	0,19	3
	1 da N	0,14	0,14	0,14	0,17	0,20	3

Tableau 26

On peut faire les observations suivantes :

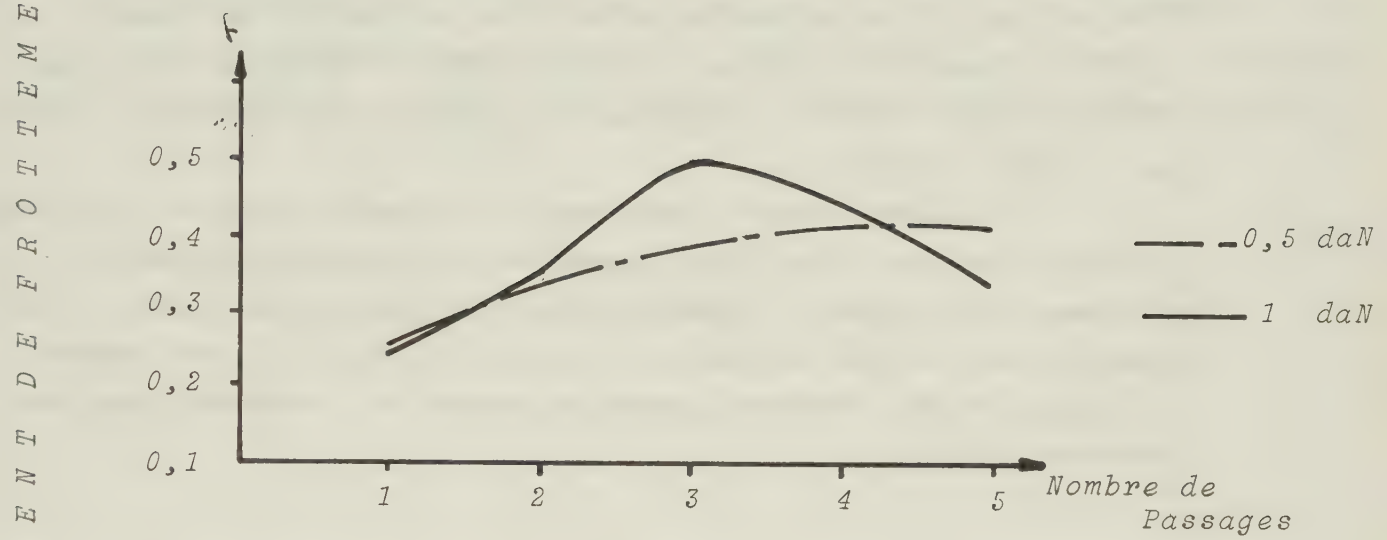
- Dans le cas de l'échantillon n° 1, le coefficient de frottement atteint une valeur élevée dès le départ et il y a destruction de la surface de l'échantillon d'aluminium au cours du premier passage.
- Dans le cas de l'échantillon n° 2 la troisième phase apparaît dès le deuxième passage.
- Dans le cas de l'échantillon n° 3 la troisième phase apparaît après 3 passages

.../...

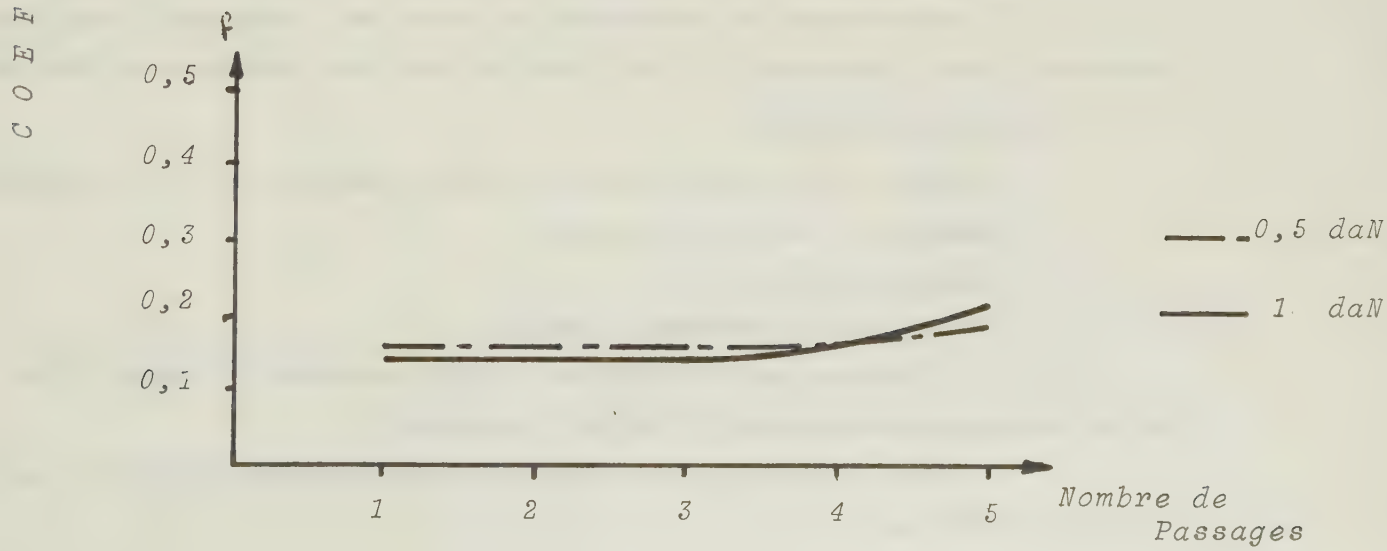


Echantillon 1

COEFFICIENT DE FROTTEMENT



Echantillon 2



Echantillon 3

Fig. 113

I - 2 - 2 - 3 Discussion des résultats

La courbe d'alumine amorphe qui recouvre l'échantillon d'aluminium peut protéger ce dernier contre l'adhésion du frotteur. Cette protection intervient quand l'épaisseur de la couche est de l'ordre de 200 Å. A épaisseur égale les couches sont moins résistantes que celles que l'on obtient par oxydation thermique.

I - 3 Conclusion

Les trois séries d'expériences présentées dans les paragraphes ci-dessus montrent que l'état d'oxydation de l'échantillon d'aluminium est un facteur essentiel de l'apparition des 3 phases successives sur le diagramme de frottement. Quand la couche d'alumine est peu épaisse, elle résiste mal aux sollicitations mécaniques bien qu'elle protège le métal contre la corrosion. Il y a apparition dès le début du glissement de l'usure adhésive entre le fer et l'aluminium, qui conduit à une destruction rapide des surfaces frottantes.

En faisant croître l'épaisseur de la couche d'alumine et son taux de cristallisation on peut faire apparaître les différentes phases sur le diagramme de frottement. L'alumine cristallisée obtenue par oxydation thermique est donc un très bon facteur de protection contre l'usure adhésive. Il faudrait étudier systématiquement les moyens de la réaliser à des températures inférieures.

II - EXISTENCE DE TROIS PHASES SUCCESSIVES DANS LE DIAGRAMME DE FROTTEMENT. DANS LE CAS D'ALUMINIUM DE GRANDE PURETE.

Les résultats de cette étude systématique, qui était nécessaire pour lever l'indétermination concernant la nature de l'aluminium à employer (notamment avant l'étude de la lubrification vont être présentés brièvement)

II - 1 Conditions initiales

- Contact : le frotteur est une bille sphérique de 5 mm de diamètre
- Ambiance : huile de vaseline
- Charge : 4 da N
- Vitesse de glissement : 5 mm/s
- Le frotteur est en bille en acier à roulement. L'échantillon est en aluminium de nuance A 95 (99,95 % de pureté)
- L'état de surface de l'échantillon d'aluminium est obtenu par tournage et avivage.

.../...

II - 2 Evolution du coefficient de frottement au cours du temps

La courbe 114 montre l'évolution du coefficient de frottement au cours du temps. La troisième phase apparaît après 52 passages, ce qui correspond, dans les conditions d'essai, à une couche d'alumine fortement cristallisée.

II - 3 Discussion des résultats

THEELE (188) et (189) a étudié l'oxydation des bains d'alumine. Il a montré que les impuretés telles que le fer, le cuivre, le zinc et le manganèse influent peu sur l'oxydation de l'aluminium. Les couches obtenues sont dans tous les cas formés exclusivement d'alumine. Ceci explique que l'on obtient des résultats analogues sur l'A 95 et l'A 5. Il faudrait étudier systématiquement ce qui se passe lorsque la teneur des éléments d'addition augmente. On pourrait ainsi connaître la phase initiale de l'usure dans le cas des alliages légers.

../...

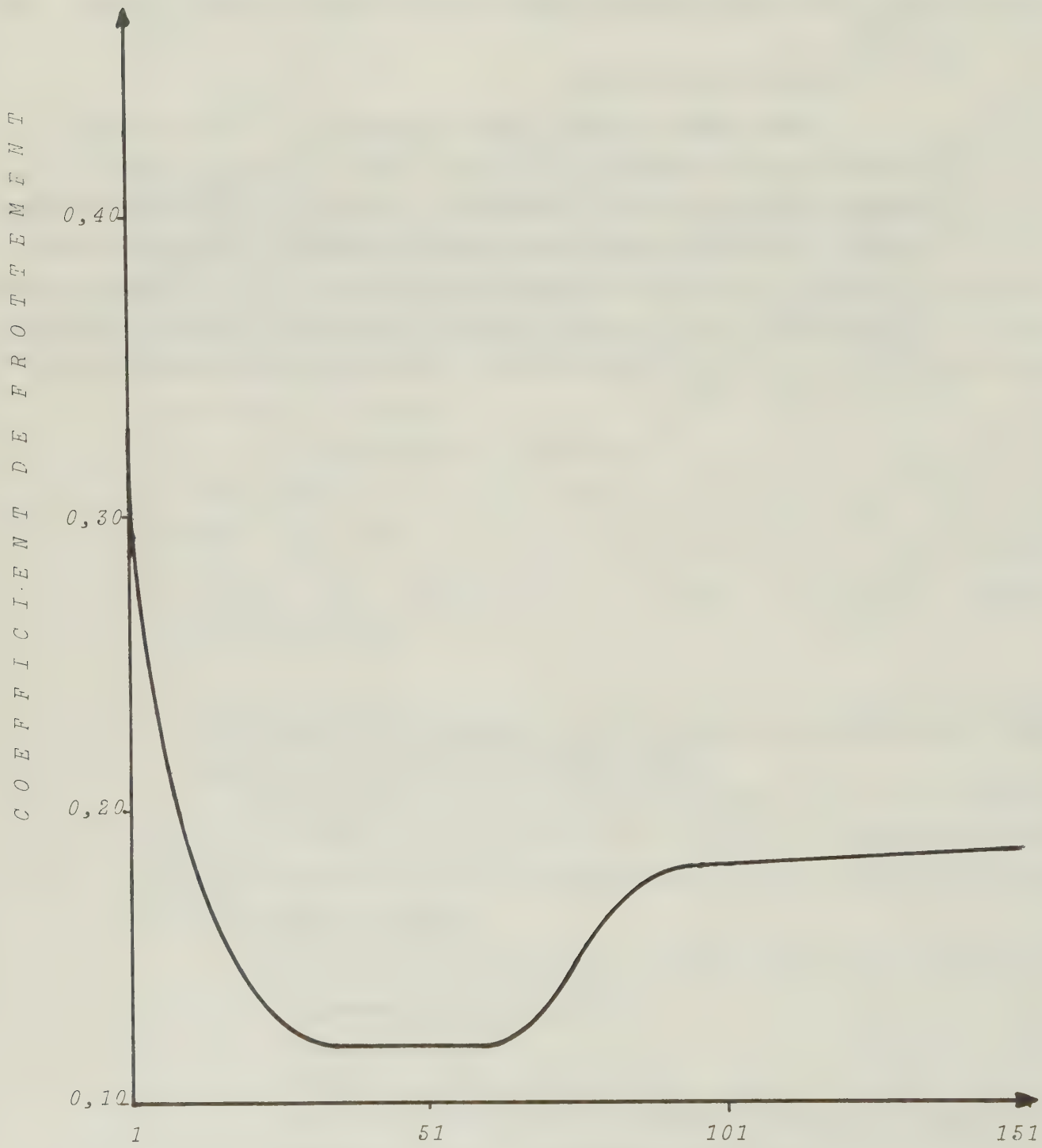

COEFFICIENT DE FROTTEMENT
0,40
0,30
0,20
0,10
1
51
101
151
Nombre de passages du frotteur

Fig. 114

III - INFLUENCE DE LA NATURE DU FROTTEUR SUR L'APPARITION DES DIFFERENTES PHASES DANS LE DIAGRAMME DE FROTTEMENT

Nous avons complété les études relatives à l'état d'oxydation de l'échantillon d'aluminium par la comparaison du comportement de deux aciers utilisés dans la construction d'outillages servant à la mise en forme des métaux (190). L'un, le 90 MV 8 est utilisé pour la réalisation des outillages de forme compliquée pour lesquels on craint des accidents de trempe. L'autre, le Z 80 WDV 06. 05. 02 ou 6, 5, 2, appartient à la classe des aciers rapides, il est utilisé dans certains cas pour construire des outils de découpe et de formage à froid. La composition déterminée par analyse chimique de ces aciers est indiquée ci-dessous :

en %	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	V	W	Fe
90 MV 8	0,91	0,25	1,81	0,013	0,018	0,06	0,25	0,01	6,15	non dosé	solde
652	0,91	0,325	0,28	0,011	0,083	0,13	4,4	4	1,76	6,63	solde

Les teneurs des éléments les plus importants sont soulignés d'un trait.

III - 1 Conditions initiales

- Contact : frotteur hémisphérique, diamètre de la calotte sphérique 10 mm
- Ambiance : huile de vaseline
- Charge :2da N
- Vitesse de glissement : 5 mm/s
- L'aluminium est de nuance A 5 (99,50 % de pureté)
- Les frotteurs sont en 90 MV 8 et en 6 - 5 - 2.

Les différents traitements thermiques subis par les frotteur en 90 MV 8 sont : chauffage à 780° C, trempe à l'huile et revenus à 150° C, 180° C, 220° C, 250° C recuits.

Les frotteurs en 6 - 5 - 2 ont subi les traitements thermiques suivants : chauffage à 1200° C, trempe à l'huile revenus à 460° C, 510° C, 550° C, 600° C, recuits.

Les états de surface des frotteurs avant glissement sont obtenus par polissage à la pâte diamantée. Les états de surface des échantillons d'aluminium sont obtenus par tournage et avivage.

Le traitement thermique consiste à placer l'échantillon d'aluminium 1 heure à 600° C dans un four aéré.

III - 2 Variation de la force de frottement au cours du temps

La figure 115 montre les enregistrements obtenus. Dans le cas du 90 MV 8 les trois phases sont très nettes. Dans le cas de 6 - 5 - 2 il y a destruction de la surface de l'échantillon d'aluminium dès le premier tour, et la force de frottement s'accroît lors des passages suivants. Le tableau 27 donne le nombre de rotations effectuées par les échantillons d'aluminium avant apparition de la troisième phase.

Nuance de l'acier constituant les frotteurs	Température de revenu	Nombre de rotations effectuées par l'échantillon d'aluminium avant apparition de la troisième phase
90 MV 8	150° C	9
	180° C	10
	220° C	9
	250° C	20
	recuit	8
6 - 5 - 2	460° C	0
	510° C	0
	550° C	0
	600° C	0
	recuit	0

Tableau 27

III - 3 Discussion des résultats

Ces expériences montrent que la structure et la composition de l'acier sont des facteurs essentiels gouvernant l'apparition de 3 phases successives sur le graphe de frottement. Les deux aciers étudiés diffèrent principalement par le fait que la structure de l'acier rapide contient des carbures libres.

.../...

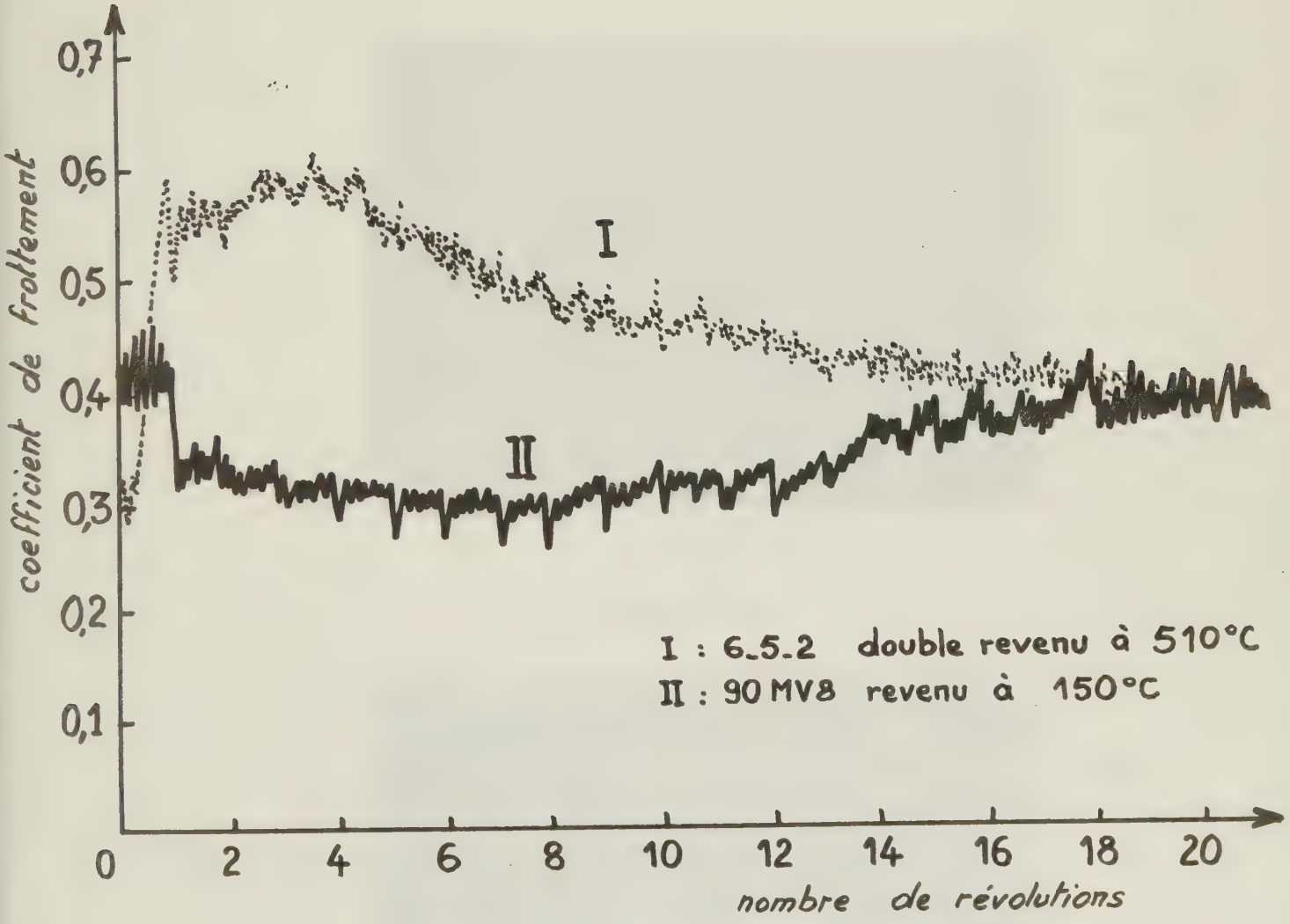
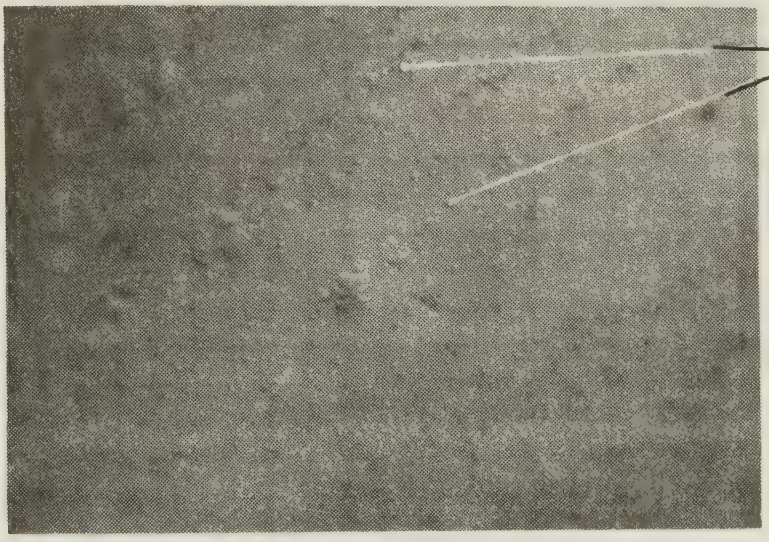

coefficient de frottement
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
nombre de révolutions
I
II
I : 6_5_2 double revenu à 510°C
II : 90 MV8 revenu à 150°C

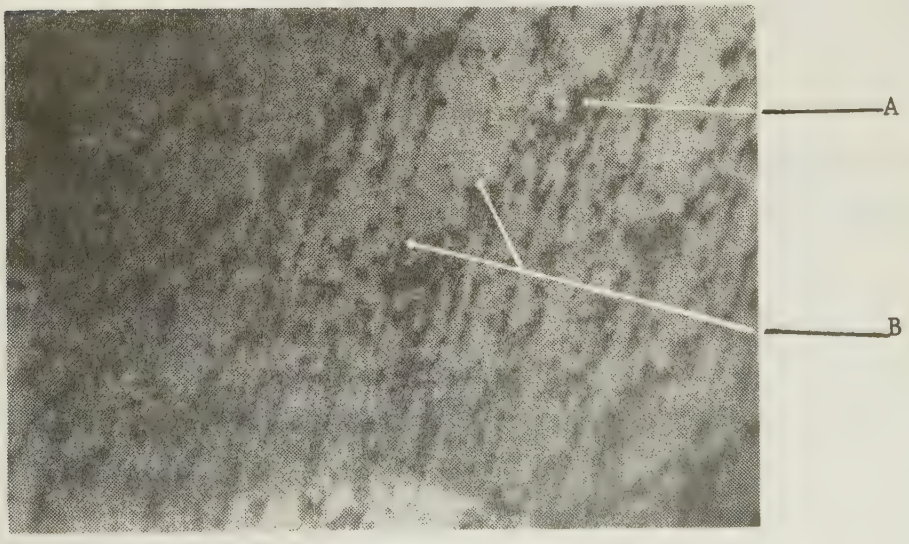
Fig. 115

Les carbures ont des duretés comparables à celles de l'alumine (2000 HV) [151]. Ils peuvent donc dès le début du mouvement rayer la couche d'alumine et l'enlever. L'adhésion aluminium/fer peut donc apparaître rapidement. La présence de ces carbures rend donc l'acier rapide sensible à l'usure adhésive lorsqu'il glisse sur l'aluminium oxydé. Ces hypothèses sont vérifiées par l'expérience. Après polissage on observe sur la surface d'un frotteur en 6-5-2 des alignements de carbures - Planche 32-1, et quand ce frotteur a glissé sur une longueur de 20 mm on observe devant les grains de carbure (B) des dépôts d'aluminium (A) Planche 32-2.



x 280

Planche 32-1



x 340

Planche 32-2

CHAPITRE 3 - ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA LUBRIFICATION SUR L'USURE DE L'ALUMINIUM RECUIT ET OXYDE THERMIQUEMENT.

Dans ce chapitre nous nous proposons d'étudier l'influence de la lubrification sur la phase initiale de l'usure d'un échantillon d'aluminium qui subit dès le début du glissement des déformations plastiques

I - Ambiances étudiées

On a étudié l'évolution de la force de frottement dans les conditions d'ambiances suivantes :

- à sec

Ceci signifie que le glissement s'effectue dans l'atmosphère du laboratoire. On sait qu'une surface métallique à l'air libre n'est jamais exempte de toute contamination. J.J. TRILLAT a montré [192] par diffraction d'électrons que des fibres de matières grasses provenant de l'atmosphère sont susceptibles de se former spontanément sur les surfaces.

- eau distillée pure ou contenant différentes quantités de tensio-actif.

On a incorporé à l'eau bidistillée différentes doses d'un agent tensio-actif appelé teepol. Les doses de teepol en volume sont approximativement de 0,01 partie pour la première et de 0,1 pour la seconde.

- Huile de vaseline contenant différentes quantités d'acide oléïque

On a préparé différents mélanges lubrifiants en ajoutant à une huile de base des teneurs croissantes en élément actif.

Le lubrifiant de base est l'huile de vaseline qui est surraffinée. Elle est constituée d'hydrocarbures de type paraffinique. Ce sont des hydrocarbures saturés à chaîne droite ramifiée ou non, non cyclique.

L'élément actif est l'acide oléique de formule chimique :
$CH_3 - (CH_2)_7 \; CH = CH - (CH_2)_7 \; COO\,H$, ces molécules possèdent un moment électrique permanent.

- Les mélanges utilisés contiennent en volume : 0 ; 0,0001 ; 0,001 ; 0,01 parties d'acide oléique.

L'hexacédène

Ce produit est le lubrifiant de base de certains mélanges mis au point recemment [193] pour la lubrification de métaux très sensibles à l'usure adhésive lors du glissement contre l'acier

- Esters de synthèse

II - Conditions initiales

- L'expérience qui dure 1 heure est effectuée dans les conditions suivantes :
- Contact : contact sphère sur plan - bille Ø 5 mm
- Ambiance : Les ambiances étudiées sont celles précisées dans le paragraphe ci-dessus à l'exclusion des esters de synthèse
- Charge : 0,5 ; 1 ; 2 ; 4 da N
- Vitesse de glissement : 5 mm/s
- L'aluminium est de nuance A 95 (99,95 % de pureté)
- Le frotteur est en acier à roulement
- L'état de surface de l'échantillon d'aluminium a été obtenu par polissage électrolytique en bain Jacquet . L'état d'oxydation est défini en plaçant les échantillons 2 heures dans un four, à l'air à 600° C. On a choisi ces conditions de traitement thermique car on a montré (chapitre 2) qu'elles permettent d'observer l'existence de trois phases successives sur le graphe de frottement lorsqu'un frotteur en acier glisse en présence d'huile de vaseline sur la surface de l'échantillon d'aluminium.

III - Evolution de la force de frottement au cours du temps

à sec -

Les résultats sont donnés dans le tableau 28 (annexe 2). La courbe 116-1 a été tracée en utilisant les chiffres inscrits sur ce tableau. Le coefficient de frottement au cours du premier passage dépasse 1,5. L'usure adhésive apparaît dès le premier passage et conduit rapidement à la destruction de la surface de l'échantillon d'aluminium. En phase 3 elle est apparue dès le premier passage.

eau distillée contenant différentes quantités d'un agent tensio-actif

Les résultats sont donnés dans le tableau 28 (annexe 2). Les courbes 116- 2,3,4 ont été tracées en utilisant les chiffres inscrits sur ce tableau En présence d'eau distillée le coefficient de frottement dépasse la valeur 1 dès le premier passage. L'usure adhésive conduit rapidement à la destruction des surfaces frottantes. Lorsque 1'eau distillée contient quelques traces de teepol le coefficient de frottement ne dépasse pas 0,14 au cours du premier passage, et 1'usure adhésive apparaît après le 3ème passage. Lorsque on augmente la teneur de 1'eau distillée en agent mouillant la deuxième phase à une durée à 60 rotations de 1'échantillon d'aluminium. On peut ainsi en augmentant la teneur de 1'eau distillée en agent tensio-actif passer de conditions de destruction immédiate (phase 3) à la conservation prolongée des surfaces frottantes (la durée de la phase 2 est supérieure à 60 rotations de 1'échantillon d'aluminium).

.../...

- huile de vaseline contenant différentes quantités d'acide oléique

Les résultats sont donnés dans le tableau 29 (annexe 2). Les courbes des figures 118 et 119 sont tracées en utilisant les chiffres inscrits sur ce tableau. La durée de la deuxième phase augmente avec la teneur de l'huile de vaseline en acide oléique. Le tableau 30 donne dans des conditions de charge et de lubrification déterminées, le nombre N_2 de rotations effectuées par l'échantillon d'aluminium avant apparition de la troisième phase.

charge en da N / lubrifiant	4	2	1	0,5
Huile de vaseline	2	2	4	14
H.V + 10^{-4} acide oléique	4	5	7	10
H.V + 10^{-3} acide oléique	25	25	> 60 *	> 60 *
H.V + 10^{-2} acide oléique	> 60 *	> 60 *	> 60 *	> 60 *

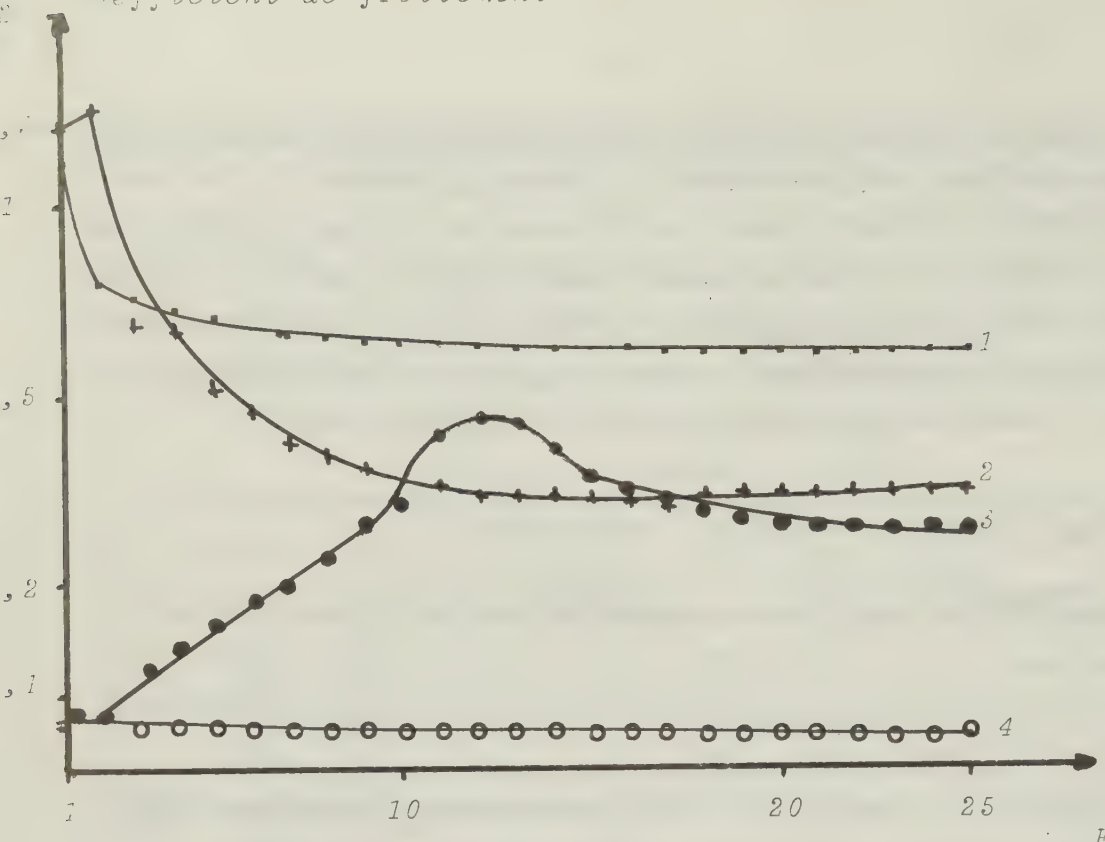
* - Expériences correspondant à des surfaces qui sont en seconde phase.

Tableau 30

- Cétène

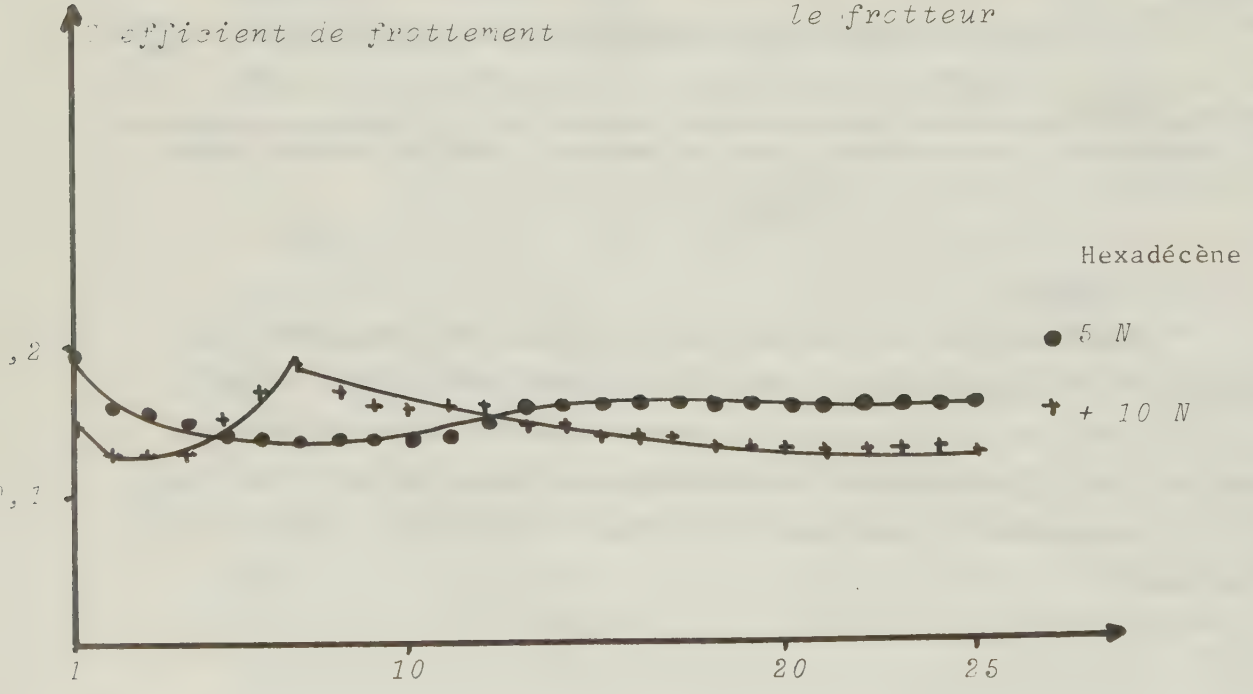
Les résultats sont donnés dans le tableau 28 (annexe 2). Les courbes de la figure 117 sont tracées en utilisant les chiffres inscrits sur ce tableau. La troisième phase apparaît après 10 rotations quand la charge est de 5 N, et après 4 rotations quand elle est de 10 N. Les résultats sont comparables à ceux que l'on obtient en utilisant l'huile de vaseline pure.

.../...



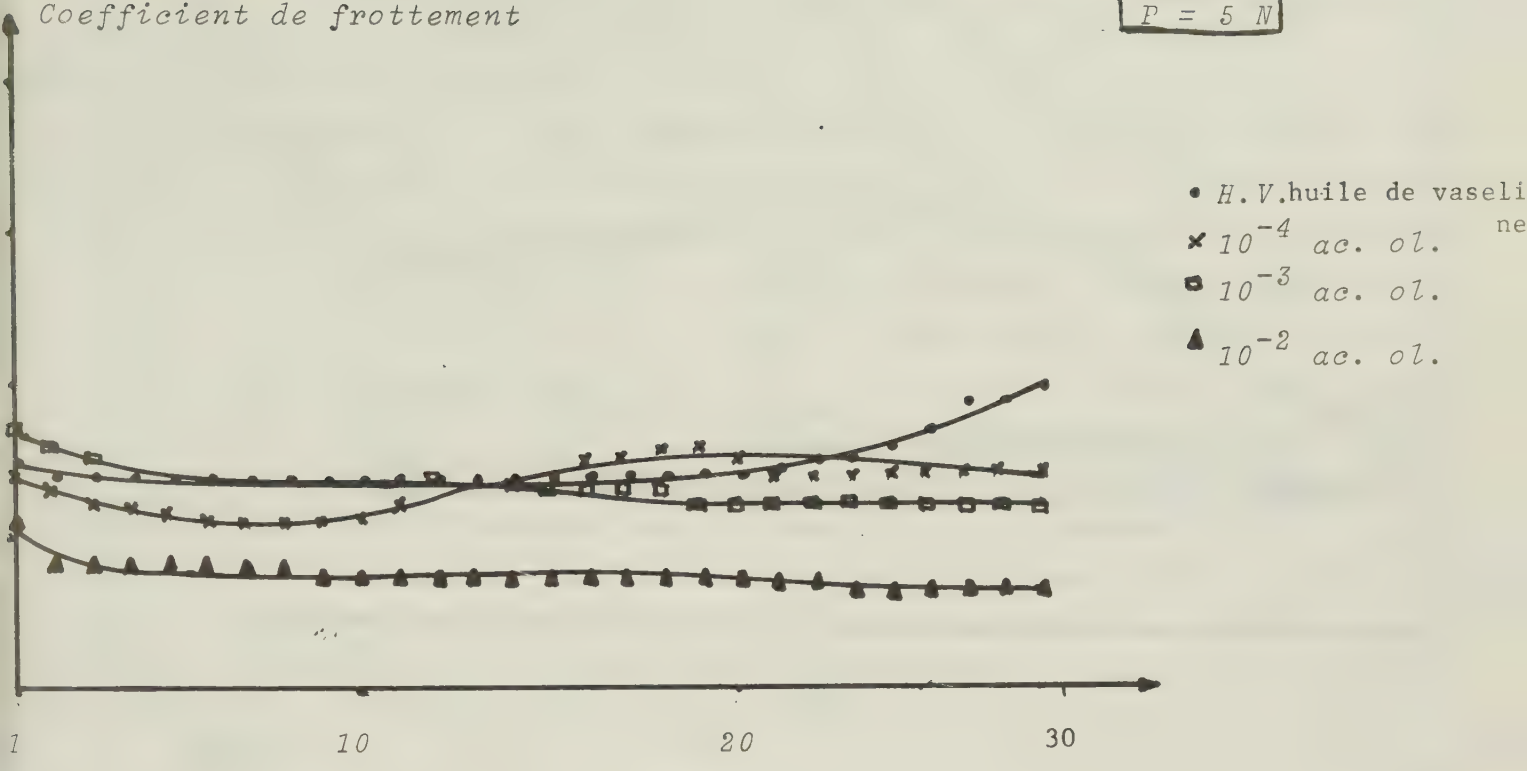
Nombre de passages d'un point du plan sous le frotteur

Fig.116



Nombre de passages d'un point du plan sous le frotteur

Fig.117


Coefficient de frottement
P = 5 N
• H.V.huile de vaseline
× 10⁻⁴ ac. ol.
□ 10⁻³ ac. ol.
▲ 10⁻² ac. ol.
1
10
20
30
Nombre de passages d'un point du plan sous le frotteur.

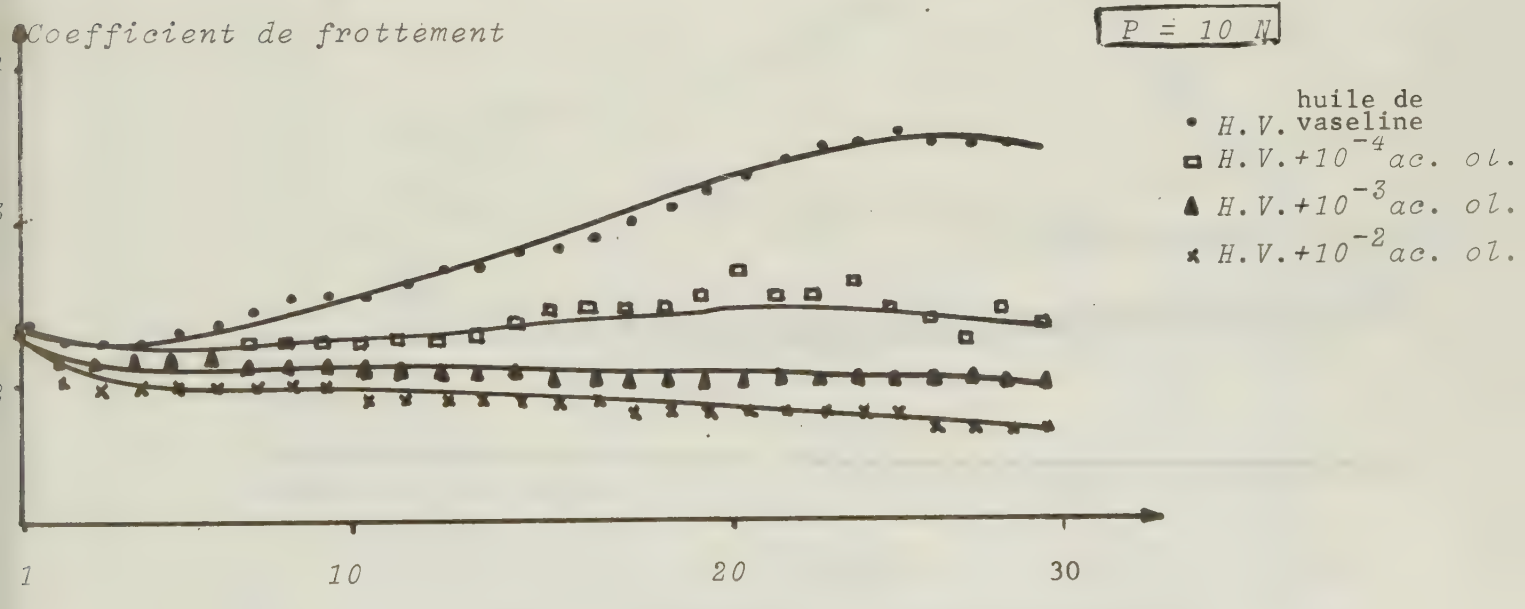
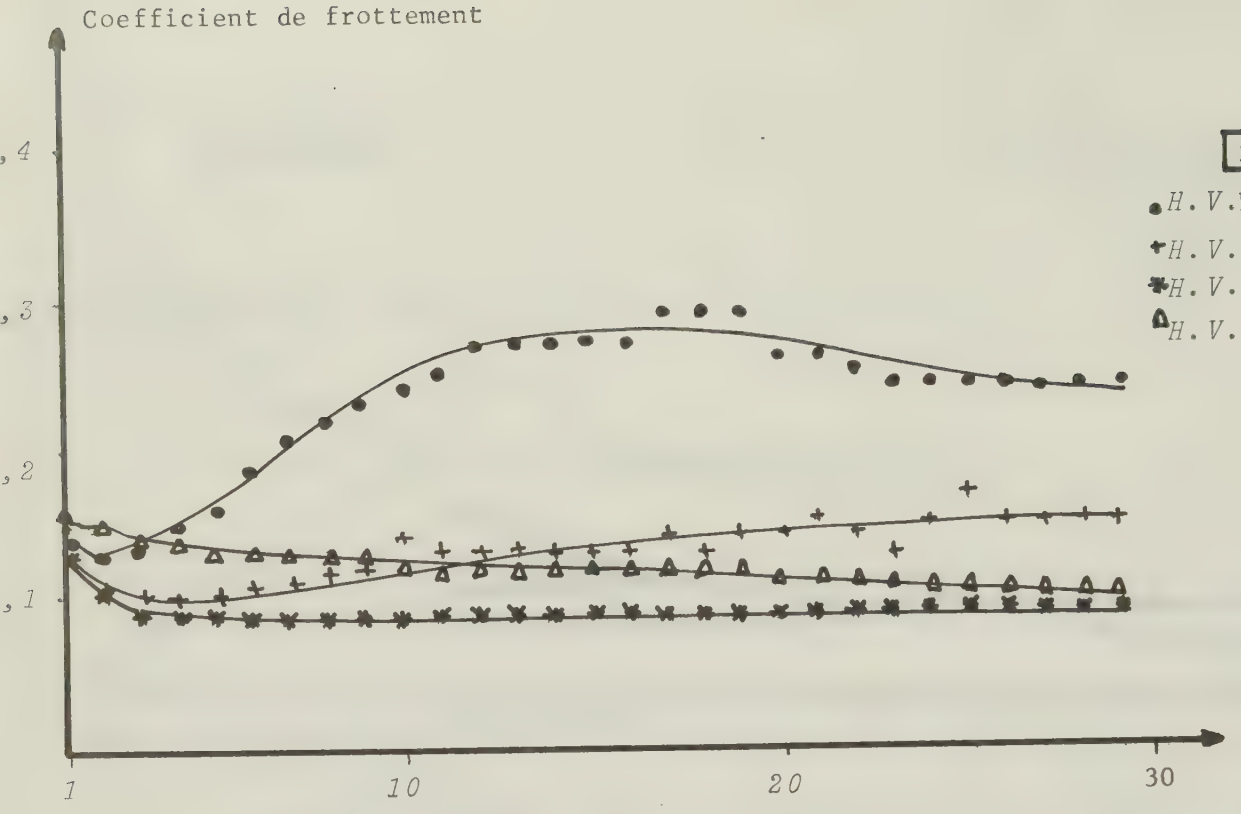
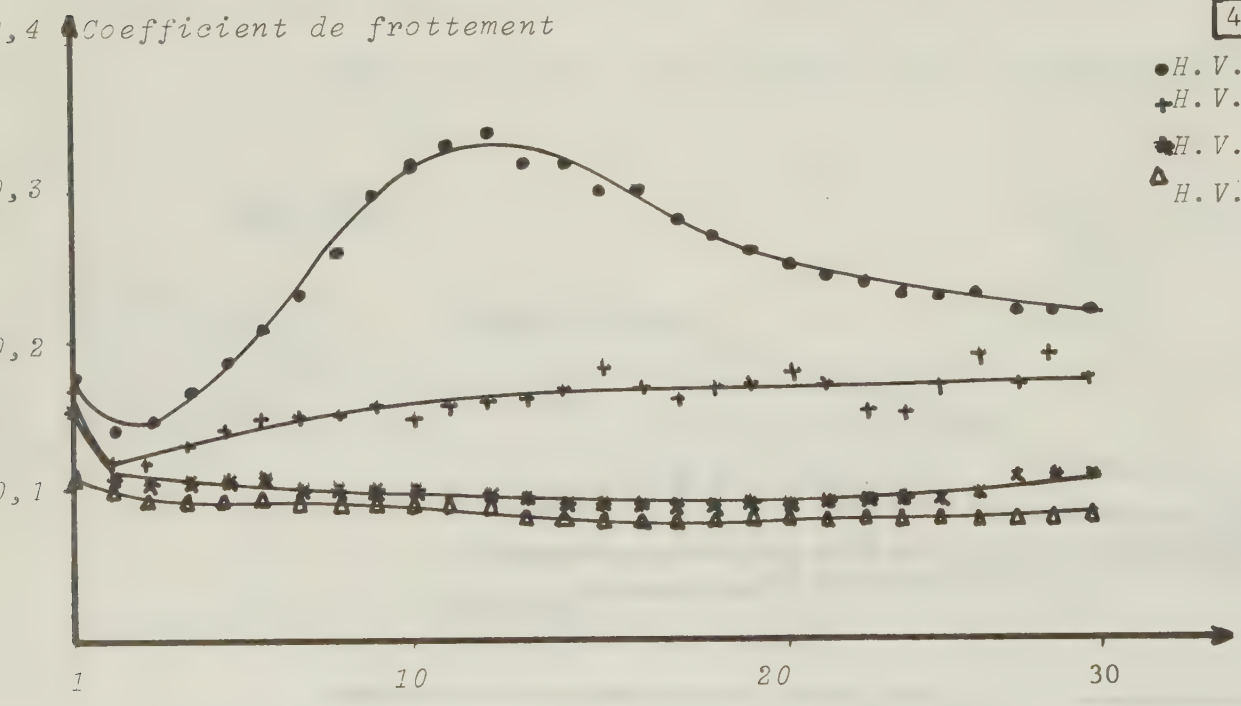

Coefficient de frottement
P = 10 N
huile de vaseline
• H.V.
□ H.V.+10⁻⁴ ac. ol.
▲ H.V.+10⁻³ ac. ol.
× H.V.+10⁻² ac. ol.
1
10
20
30
Nombre de passages d'un point du plan sous le frotteur

Fig. 118





A9 poli électrolytiquement et recuit

Fig. 119

IV - Mesure de la largeur de trace en fin d'expérience dans le cas des mélanges lubrifiants contenant de l'huile de vaseline et de l'acide oléique.

A la fin de l'expérience, c'est-à-dire après une heure de glissement, on a mesuré la largeur de trace à l'aide de la méthode de la coupe optique de Schmaltz Les résultats des mesures sont donnés dans le tableau 31. Pour obtenir l'un quelconque des chiffres inscrits sur ce tableau nous avons fait la moyenne de plusieurs lectures. En effet la largeur de la trace varie quand on se déplace dans la direction du glissement. Les photos 33-1 et 33-2 montrent la variation de la largeur de trace quand le frotteur franchit un joint de grains. Cette trace a été obtenue sous une charge de 40 N en présence d'huile de vaseline contenant 0,01 partie de volume d'acide oléique. Les photos 33-3 - 4 montrent l'apparition de la phase d'usure adhésive. Les destructions commencent dans certains grains sur lesquels on observe le décollement d'une mince couche superficielle, puis progressivement les dommages apparaissent sur toute l'étendue de la trace de frottement. Ces exfoliations se produisent dans des directions perpendiculaires à la vitesse de glissement, et sont la conséquence de phénomènes de fatigue se manifestant par des repoussages de matière sur les joints de grain et des rotations de cristaux dans le voisinage de la trace.

Charge en N Lubrifiant	40	20	10	5
Huile de vaseline	1,5	1,20	0,87	0,61
H.V. + 10^{-4} acide oléique	1,85	1,30	0,80	0,58
H.V. + 10^{-3} acide oléique	1,90	1,15	* 0,73	* 0,48
H.V. + 10^{-2} acide oléique	* 1,60	* 1,12	* 0,80	* 0,55

Largeur de trace en mm, dans des conditions déterminées de charge et de lubrification

Tableau 31

* mesures correspondant à des surfaces qui sont en seconde phase.

Au sujet des données inscrites sur ce tableau on peut faire les remarques suivantes en étudiant la largeur de trace (considérée comme représentative de l'usure).

Les mesures inscrites sur les premières et seconde lignes correspondent à des surfaces sur lesquelles l'usure en est à la troisième phase. Sur la troisième ligne, les surfaces usées sous des charges de 5 à 10 N en sont à la seconde phase, les surfaces usées sous des charges de 20 et 40 N en sont à la troisième phase. La quatrième ligne correspond à des surfaces qui en sont toutes à la seconde phase.

1°) La comparaison des mesures des troisième et quatrième lignes obtenues sous des charges de 5 et 10 N et correspondant à des surfaces qui sont en seconde phase montre que la concentration en acide oléique accroît la plastification des couches superficielles. Ces observations sont en accord avec les conclusions de Rehbinder concernant l'effet des tensio-actifs sur les couches superficielles des métaux. Il a montré qu'un lubrifiant actif plastifie les couches superficielles du métal en abaissant sa limite élastique. En effet, l'adsorption d'éléments actifs sur la surface d'un solide cristallin provoque une diminution de l'énergie superficielle. Cette diminution de l'énergie superficielle facilite la sortie des dislocations et accroît la vitesse de déformation de la couche superficielle du métal.

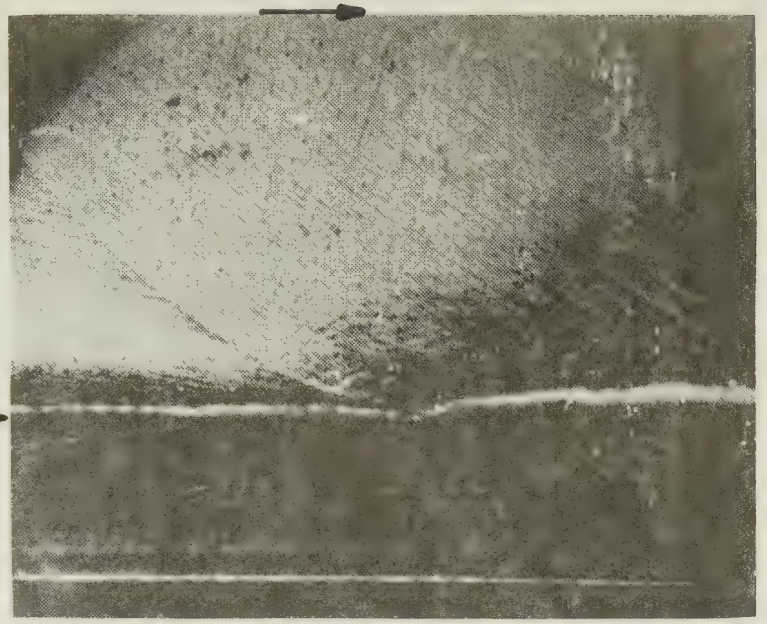
2°) La comparaison des résultats montre également qu'à partir d'une certaine charge, voisine de 2 da N, l'usure est beaucoup plus rapide lorsque le lubrifiant contient de l'acide oléique.

Rappelons que Rehbinder et ses collaborateurs ont fait des observations analogues dans l'étude de l'usure des surfaces rugueuses en présence de lubrifiants actifs et inactifs :

a) l'évolution du volume usé en fonction du temps pendant la phase initiale est beaucoup plus rapide en présence d'élément actif.

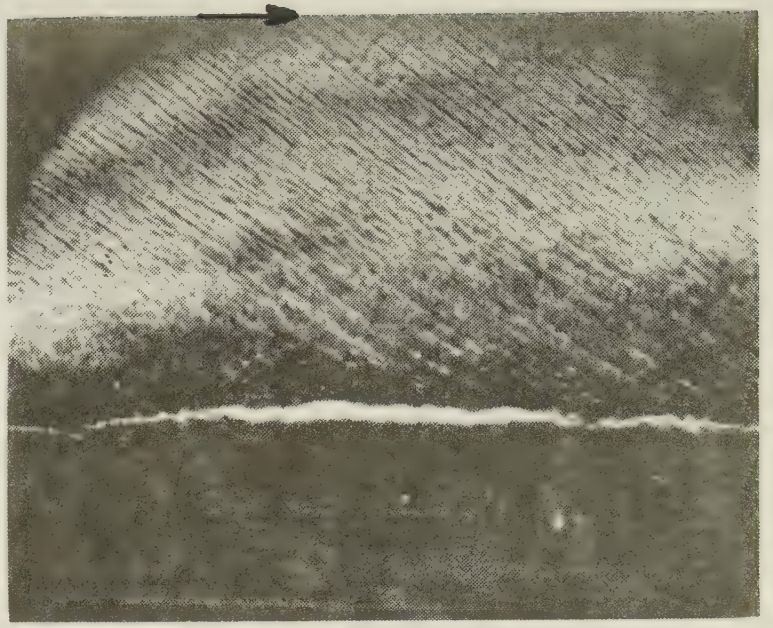
b) si on étudie l'influence de la charge, on observe l'existence d'une charge critique à partir de laquelle l'usure est plus rapide en présence d'un élément actif.

Donc la présence d'acide oléique, élément actif, dans l'huile de vaseline, élément inactif (vis à vis des métaux) a pour effet d'accroître la plastification des couches superficielles pendant les phases 1 et 2, et ensuite si la charge est suffisante (2 da N dans le cas de nos expériences) d'accélérer le processus d'usure adhésive.



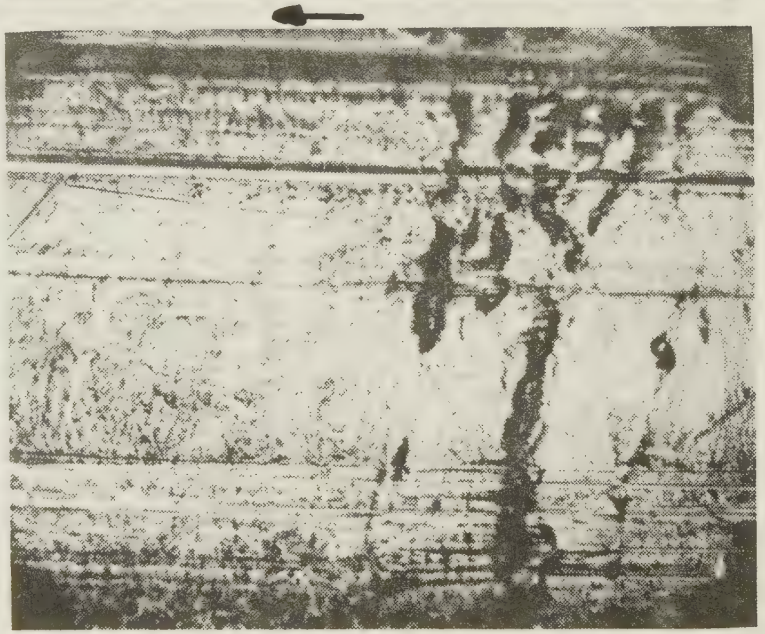
x 140

1



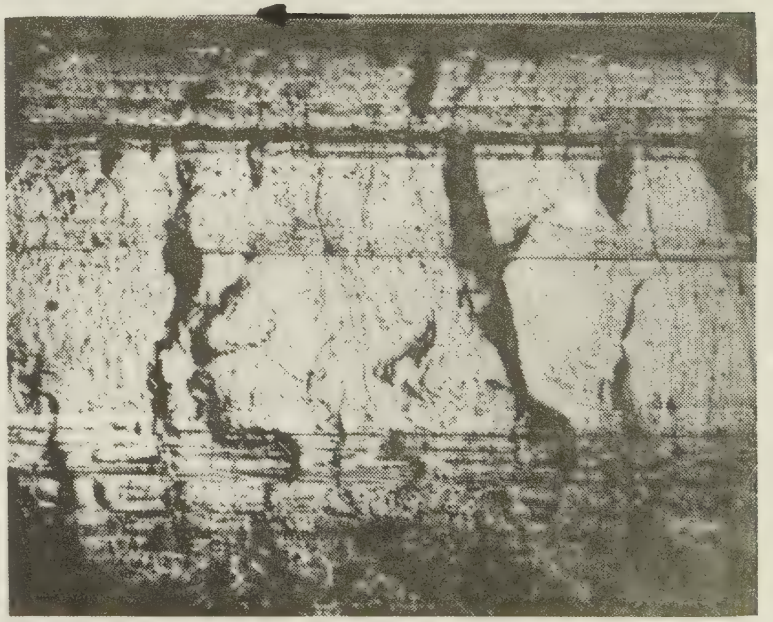
x 140

2



x 140

4



x 140

3

Photographies de la trace obtenue sous une charge de 40 N
en présence d'huile de vaseline contenant 10^{-2} d'acide oléique
Les flèches indiquent la direction du déplacement

Planche 33

V - Comparaison des résultats obtenus avec deux esters de synthèse

Les lubrifiants utilisés sont :

a) Dimérate d'Ethyle -

(Ester de l'acide dimère) acide de synthèse obtenu à partir de l'acide oléique avec l'alcool éthylique).

$$C_2H_5 - O - \overset{\overset{O}{\|}}{C} - (CH_2)_{34} - \overset{\overset{O}{\|}}{C} - O - C_2H_5$$ DIPOLAIRE

1 mole de diacide + 2 moles de monoalcool 1 diester (dipolaire)

b) Sebaçate de méthyle -

(Ester de l'acide sébacique) ou décanédioïque - avec l'alcool méthylique

$$CH_3 - O - \overset{\overset{O}{\|}}{C} - (CH_2)_8 - \overset{\overset{O}{\|}}{C} - O - CH_3$$ DIPOLAIRE

1 mole de diacide + 2 moles de monoalcool 1 diester (dipolaire)

Conditions initiales -

- Contact : bille - plan
- Charge : 4 da N
- Vitesse de glissement : 5,3 mm/s
- Bille : acier à roulement Ø 5 (100 C 6)
- Aluminium A 95 - tourné et avivé
  - recuit 600° C pendant 1 h à l'air
- Ambiance : dimérate d'éthyle pur, sébaçate de méthyle pur

Evolution de la force de frottement au cours du temps -

Cette évolution est montrée sur la figure120

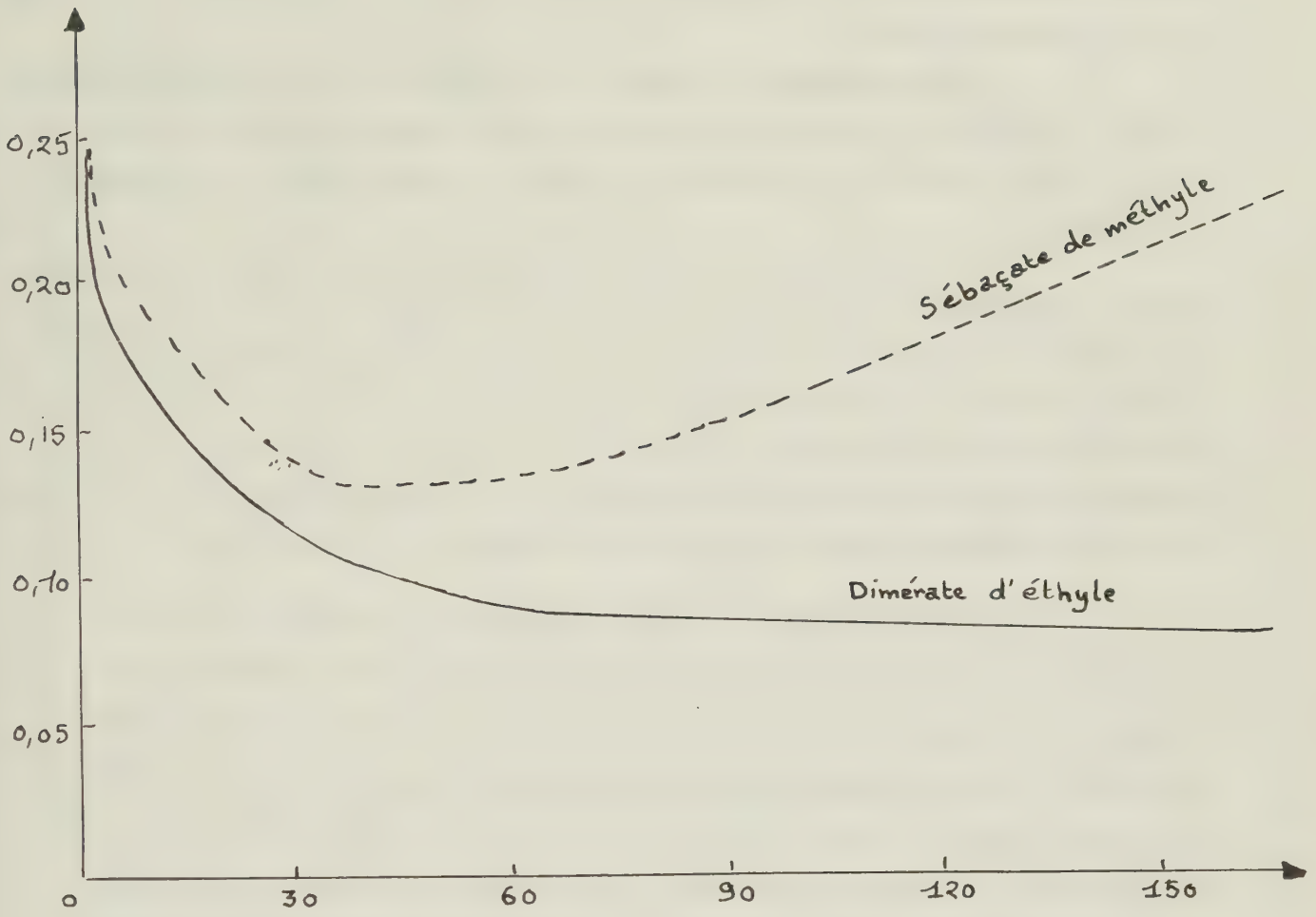
Discussion -

La destruction de la surface d'aluminium dans une ambiance de sébaçate de méthyle

s'effectue après 40 passages environ.

La surface de l'aluminium dans le cas du dimérate d'éthyle est presque intacte après 150 passages.

La supériorité du dimérate d'éthyle provient vraisemblablement du fait que sa chaine est plus longue que celle du sébaçate de méthyle et que le pont entre les deux extrêmités polaires susceptibles de se fixer à la surface se fait plus aisément et résiste mieux aux sollicitations mécaniques.



Nombre de passages sous le frotteur

Evolution de la force de frottement en fonction du nombre de passages lors du glissement en présence de corps dipolaires.

Fig. 120

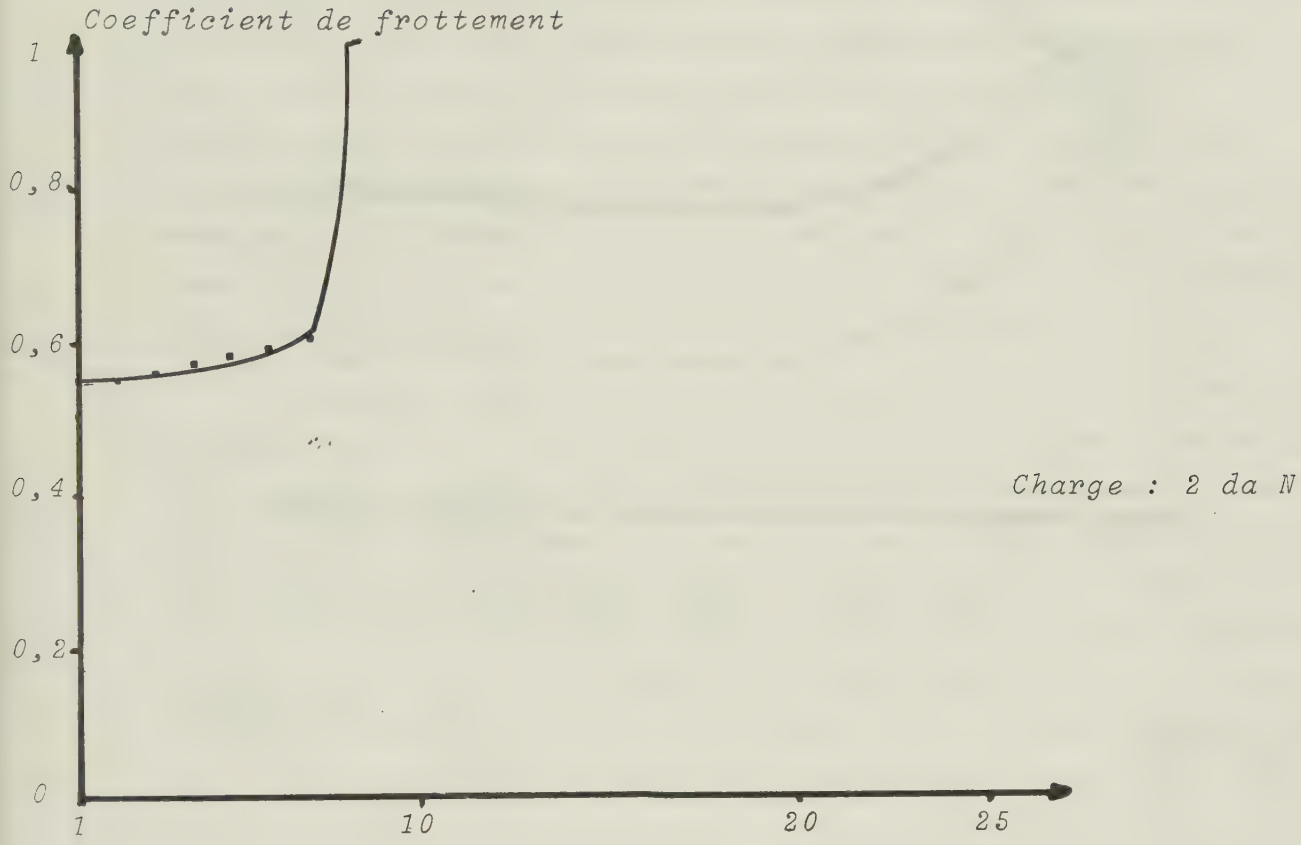
VI- Discussion des résultats

Les résultats présentés dans les paragraphes ci-dessus montrent qu'un choix convenable du lubrifiant permet de régler l'apparition et la durée des différentes phases.

Réciproquement la durée et l'apparition des différentes phases devrait permettre de connaître l'efficacité d'un lubrifiant dans la lutte contre l'usure adhésive, au sujet de la phase 3 on peut faire les remarques suivantes :

1°) Pour un lubrifiant donné l'apparition de la phase 3 dépend de l'état d'oxydation de l'échantillon d'aluminium, comme on l'a vu dans le chapitre II, et comme on peut le vérifier lorsque le lubrifiant est l'eau distillée. On fait une expérience dans des conditions initiales identiques à celles qui ont été décrites ci-dessus, sur des échantillons d'aluminium dont les surfaces ont été préparées par avivage. Sur la figure (121) on peut voir que la phase 3 apparaît après 7 rotations de l'échantillon d'aluminium.

2°) Si par suite de la faible épaisseur de la couche d'alumine (cas des surfaces préparées par polissage électrolytique) la phase 3 apparaît dès le premier passage, la présence d'un tensio-actif peut réduire l'effet de l'adhésion. Pour le vérifier on a étudié à l'aide du tribomètre alternatif l'usure de l'aluminium poli électrolytiquement après recuit. Les conditions initiales sont précisées sur les figures 122-1 et 122-2. On voit la présence d'un tensio-actif comme l'acide oléique diminue le coefficient de frottement, et accroît la valeur de la résistance de contact au cours des passages successifs.



Nombre de passages d'un point du plan sous le frotteur

*Fig.*121

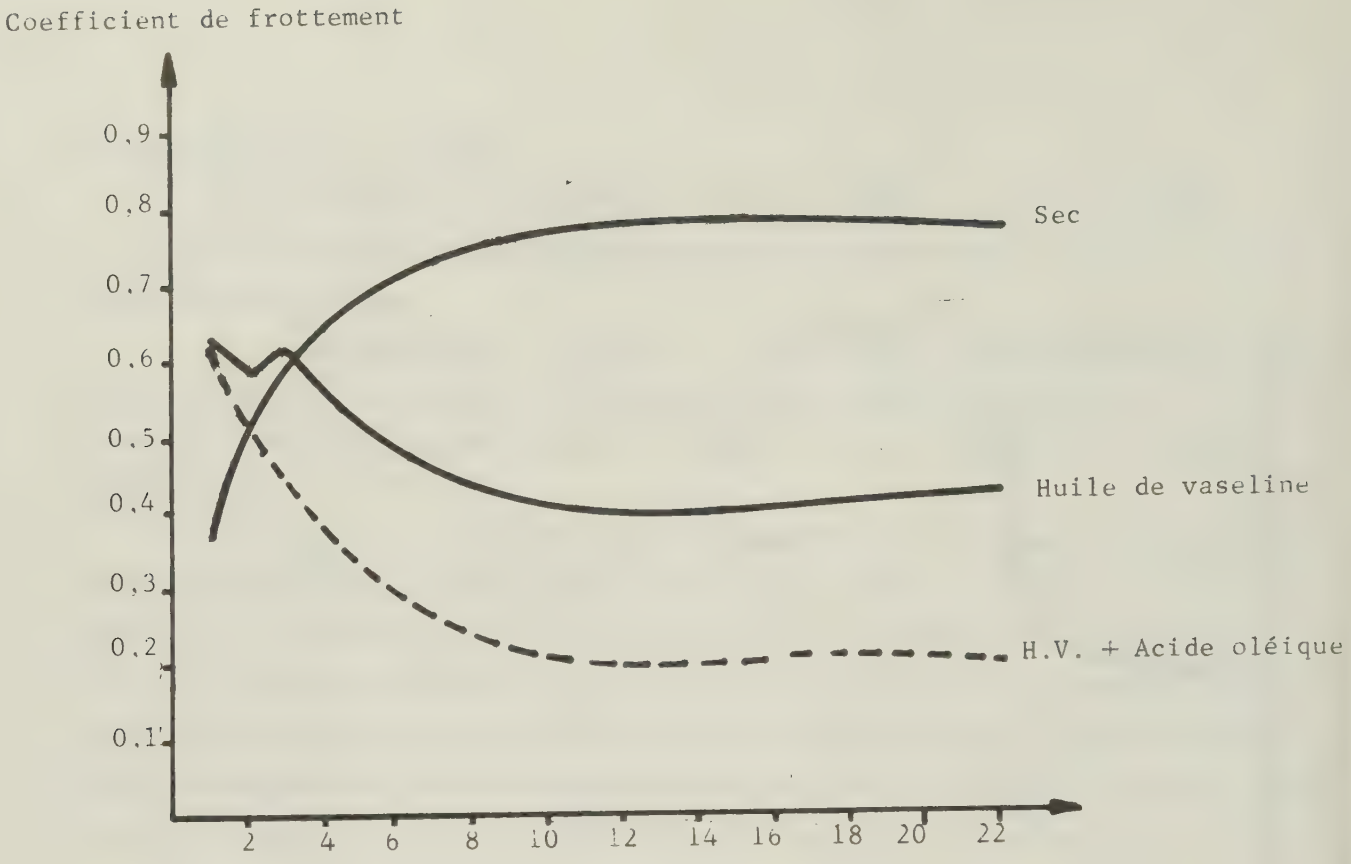


Fig. 122-1 Nombre de passages sous le frotteur

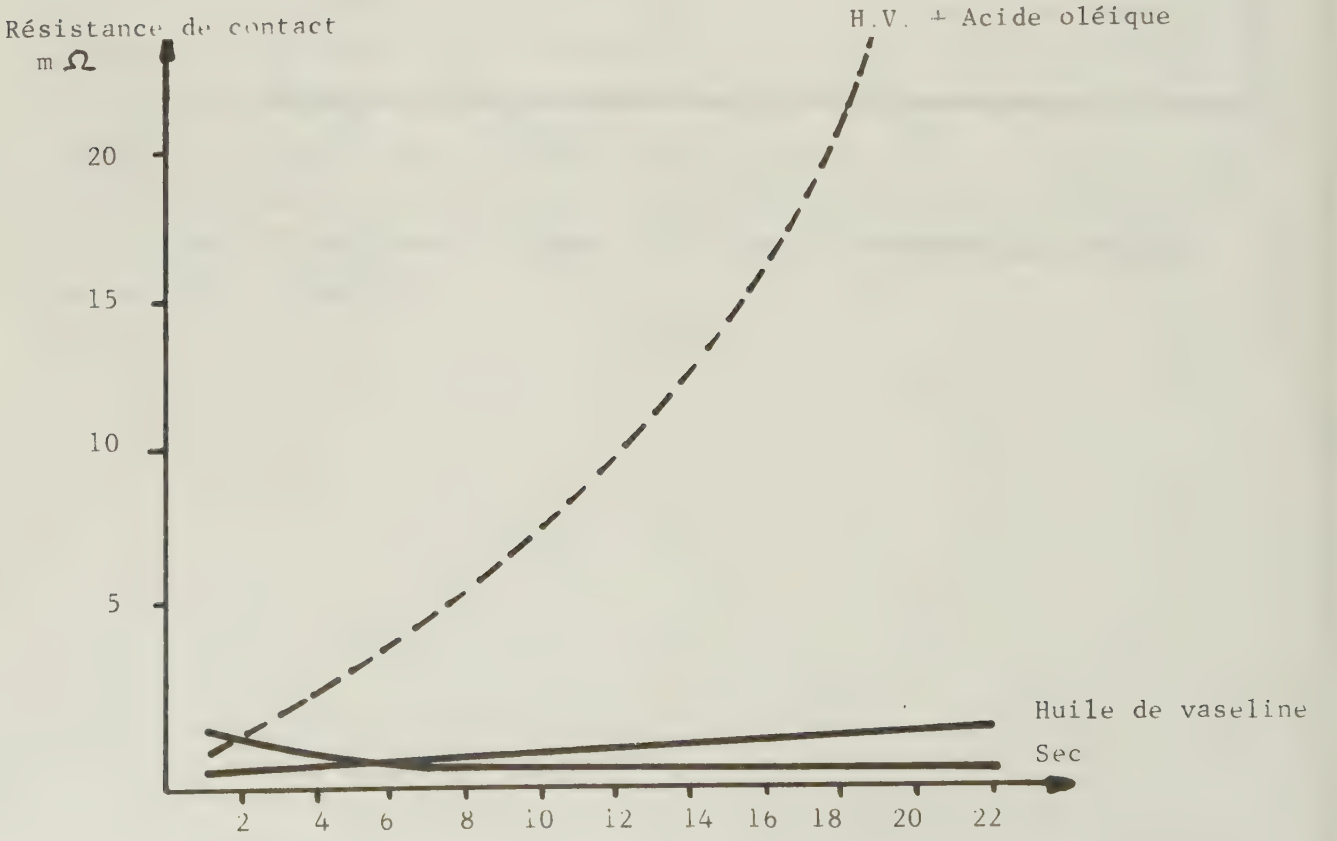


Fig. 122-2 Nombre de passages sous le frotteur

Conditions initiales : Contact sphère sur plan - frotteur Ø 10 mm, charge 2,16 da N, vitesse 1mm/mn, frotteur en XC 38 carbonitruré, piste en A 99

CONCLUSIONS -

L'étude effectuée se compose de trois parties principales.

Dans la première partie de ce travail nous exposons et discutons les différents processus responsables de l'usure, considérée comme une détérioration produite par l'usage. Les méthodes expérimentales mises au point pour étudier la phase initiale de l'usure sont décrites dans la deuxième partie. Dans la troisième partie nous présentons les résultats obtenus lors de l'étude de la phase initiale de l'usure d'un échantillon d'aluminium, déformé plastiquement et écroui par le glissement contre un frotteur en acier. Les endommagements et transformations des surfaces frottantes ont été analysés à l'aide de plusieurs méthodes qui toutes concourent à une meilleure connaissance des phénomènes.

Quand on réduit le rôle de l'adhésion (en glissant en présence d'huile de vaseline sur une surface oxydée) l'évolution de la force de frottement au cours du temps présente trois phases successives. Elles traduisent les transformations et les endommagements successifs de la surface de l'échantillon d'aluminium. Pendant la première phase l'aluminium est déformé et écroui. L'effet de l'adhésion entre l'acier et l'aluminium est négligeable grâce à la présence de l'alumine et de l'huile de vaseline. Sur cette surface durcie, mais restée lisse, le frotteur éprouve une résistance de frottement plus faible, c'est la seconde phase, correspondant à la période d'utilisation de la surface de l'échantillon d'aluminium. Cette période (caractérisée par une usure faible et un frottement régulier) qu'il faut prolonger prend fin lorsque l'usure adhésive commence à jouer un rôle destructeur. Elle commence sur certains grains, puis s'étend plus ou moins rapidement à l'ensemble de la trace de frottement. Sur le frotteur, on observe l'action de deux modes d'usure principaux, l'abrasion pendant les phases 1 et 2, et l'adhésion pendant la phase 3.

L'étude de l'influence de la nature des surfaces frottantes montre que l'état d'oxydation de l'échantillon d'aluminium et la nature métallurgique du frotteur en acier sont des facteurs essentiels gouvernant l'apparition et la durée des différentes phases du frottement. Dans le cas de l'aluminium oxydé thermiquement l'épaisseur et le taux de cristallinité de l'alumine règlent l'apparition et la durée des première et seconde phases. Dans nos expériences l'épaisseur critique permettant d'observer les première et seconde phases est de 200 A°. On peut ainsi grâce à un simple traitement d'oxydation thermique maitriser la phase initiale de l'usure. L'étude du comportement des aciers rapides montre que les carbures libres favorisent l'apparition de l'usure adhésive en détruisant la couche d'alumine protectrice.

La présence d'un agent tensio-actif (acide oléique) dans le lubrifiant de base (huile de vaseline) permet la prolongation des phases 1 et 2 et minimise l'effet de l'adhésion pendant la phase trois si la pression reste inférieure à une certaine pression critique.

On peut obtenir une même durée de la phase utile en jouant sur l'un des paramètres suivants : oxydation de l'échantillon d'aluminium, composition du lubrifiant, charge, nature métallurgique du frotteur. La méthode des trois phases facile à maitriser, (nous l'avons vérifiée sur différents tribomètres) peut être appliquée à l'étude de l'efficacité des lubrifiants servant à la mise en forme de l'aluminium et a déjà servi à choisir des matériaux destinés à glisser sur l'aluminium. Il resterait à appliquer les résultats obtenus au cours de ce travail à l'étude de l'usure d'autres métaux tels que alliages légers et aciers inoxydables, en présence d'un lubrifiant. En accordant chaque fois une grande attention à la nature et aux propriétés des oxydes qui recouvrent les surfaces.

Sur le plan pratique, il est aussi important d'identifier les processus responsables de la destruction de chacune des surfaces frottantes que de mesurer des pertes de masse d'échantillons usés au cours d'essais comparatifs. Le champ de travail qui se présente ainsi au chercheur est considérable, mais il présente un grand intérêt économique et s'inscrit bien dans le contexte industriel actuel.

Annexe 1 - BIBLIOGRAPHIE CONCERNANT L'OXYDATION THERMIQUE DE L'ALUMINIUM

On a résumé ci-dessous les travaux les plus importants concernant l'oxydation thermique de l'aluminium. L'aluminium obtenu par le traitement a une structure différente de celle que l'on obtient par les procédés d'oxydation anodique classique et on a vu au chapitre II (paragraphe I-2-2) qu'à épaisseur égale elle présente une plus grande résistance à l'usure.

L'oxydation à l'air de l'aluminium se traduit par la formation d'une couche d'alumine amorphe et au-delà de 375° C, par l'apparition et le développement de cristaux d'alumine γ à l'interface métal - oxyde amorphe. Parmi les auteurs qui ont étudié l'oxydation thermique de l'aluminium on peut citer : Doherty et Davis [183], Doherty [184], Dignan et Fawcett [185], Hart et Maurin [186].

DOHERTY-DAVIS -

L'oxydation de l'aluminium de grande pureté 99,992 % se fait à l'air, les auteurs ont remarqué que lorsque le métal est porté à une température comprise entre 400° et 600° C puis est refroidi brutalement il se forme des piqûres par condensation de lacunes sous la couche d'oxyde. Ils utilisent ce phénomène pour se procurer des échantillons d'oxyde soumis ensuite à l'analyse par microscopie électronique. Les schémas de la figure 123 montrent le principe d'obtention de ces répliques.

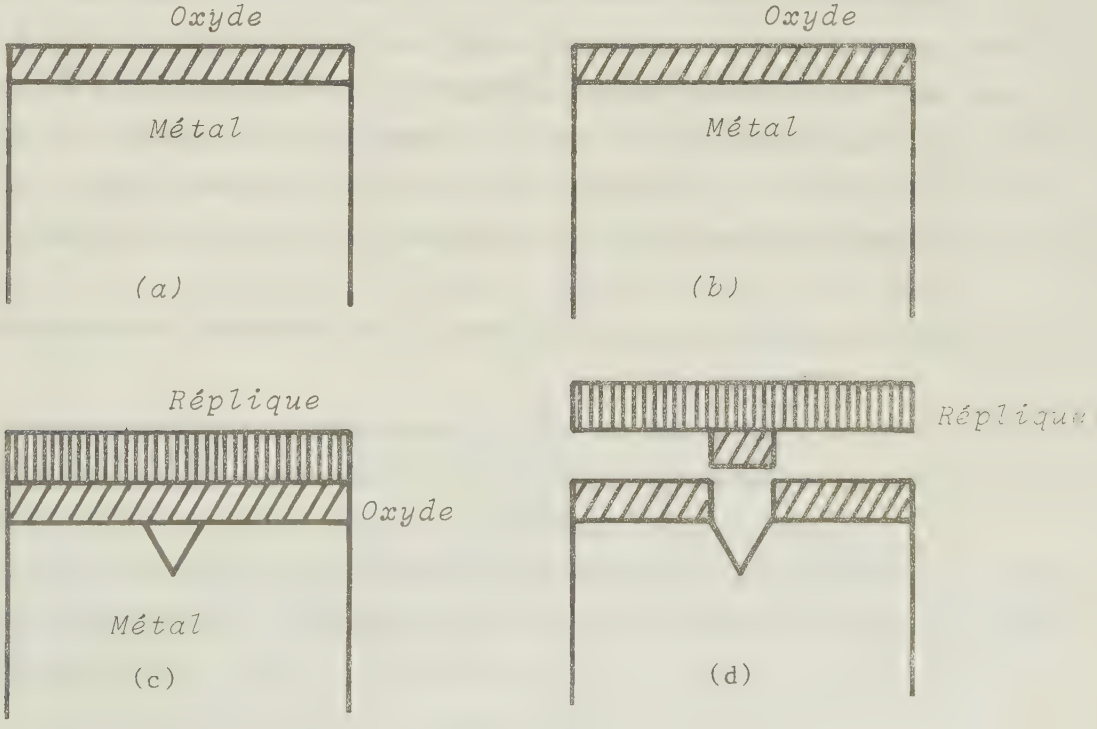


Fig. 123

a) le cristal est chauffé, formation de l'oxyde.
b) une piqûre se forme au refroidissement sous l'oxyde.
c) on applique à la température ambiante un revêtement de nitrate de cellulose.
d) l'enlèvement de la réplique provoque le décollement d'une particule d'oxyde.

En portant l'échantillon d'aluminium à une température de 600° C pendant 15 minutes, les auteurs ont observé la formation d'alumine cristallisée à l'interface métal oxyde, cette oxyde cristallise dans le système cubique face centrée et la dimension de la maille est de $7,9 \pm 0,1$ Å. Cette alumine cristallisée croît par diffusion de l'oxygène au travers de la couche d'alumine amorphe. Pour le prouver ils ont placé dans un four à 600° C des échantillons portant une couche d'oxyde anodique d'épaisseur 100, 200, 400 Å et constaté que le nombre de cristallites décroît avec l'épaisseur de l'oxyde. Sur le plan (100) l'oxyde est polycristallin, et monocristallin sur les faces (110) et (111) Il y a environ 10^{10} cristallites par cm^2.

DOHERTY (1965)

L'auteur étudie à l'aide de la technique exposée précédemment l'oxyde d'aluminium formé thermiquement sur des échantillons monocristallins. Il pense que la variation périodique de l'énergie d'activation des ions entraine une variation périodique de la structure de l'interface métal/oxyde, donc une variation périodique de l'épaisseur de l'oxyde.

Il suppose que la première couche d'atomes d'oxygène adsorbés est telle qu'il existe alors un ordre à longue distance dans la première couche d'oxyde. On peut alors la décrire comme un cristal bidimensionnel et on suppose que métal et oxyde ont la même structure cristalline mais des paramètres différents, l'accommodation se fait par des déformations élastiques dans l'oxyde, décrites en termes de dislocations (Frank, Van der Merwe). Le réseau de l'oxyde, à la limite contient des zones fautées et non fautées présentant une certaine périodicité. La largeur de la région fautée dépend des forces relatives à l'intérieur et à travers l'interface. Cet interface présente des zones à réseaux accordés, alternant avec des zones à réseaux désaccordés. Dans les premières zones l'énergie d'activation est faible, et l'oxyde est épais. Dans les secondes, l'énergie d'activation est importante et l'oxyde est mince.

La croissance du film après cette première couche se fait par diffusion des ions métalliques et est amorphe, malgré le haut degré d'ordre de la première couche. Ceci est sans doute dû au fait que l'oxyde croît à basse température et qu'il croît en contact avec le gaz désorganisé plutôt qu'avec le métal ordonné. Ceci est mis en évidence par des expériences de piqûres.

L'épitaxie de croissance de l'oxyde sur les faces (110) et (111) peut s'expliquer en considérant qu'il y a germination sur les zones accordées. Tous les nucléi ont donc même orientation. Ils poussent ensuite latéralement et quand ils se rencontrent on a un monocristal. Expérimentalement, on vérifie bien que les nucléi poussent sous les parties épaisses de l'oxyde amorphe.

Pour les plans 100, il n'y a pas de zones différentes les unes des autres la germination se fait au hasard d'où l'oxyde polycristallin.

DIGNAM et FAWCETT (1966)

Les auteurs ont mesuré les gains en poids en fonction du temps d'échantillons d'aluminium polis électrolytiquement, chauffés à 478° C, 505°C 530° C, 549° C, 601° C, en présence d'oxygène sec. Leur travail concerne principalement le mécanisme et la cinétique de formation et de croissance des cristallites d'alumine. Les résultats expérimentaux sur lesquels s'appuient leurs études théoriques sont les suivants :

1) les cristallites croissent en pénétrant dans le métal et ne ressortent pas de la surface.

2) les cristallites croissent par apport d'oxygène au travers du film d'oxyde amorphe.

3) les cristallites se forment très rapidement, leur durée de formation est courte en comparaison de leur période de croissance. Une fois formée, la densité de cristallite est indépendante du temps d'oxydation. Il est ainsi indépendant de la température d'oxydation dans le domaine de température prévu de 450° à 600° C.

4) la densité de cristallites varie d'un grain à l'autre, ainsi qu'aux joints de grains.

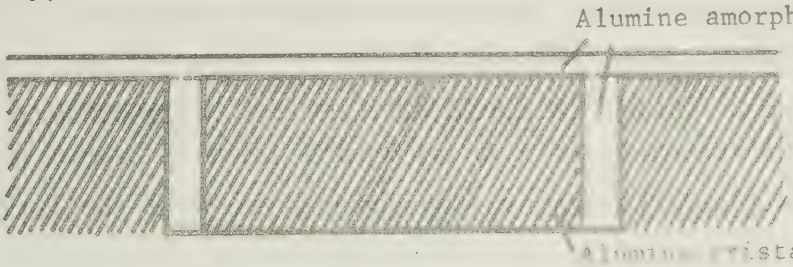
5) autant qu'on puisse le savoir par l'observation des micrographies la largeur des cristallites croît à peu près linéairement avec le temps jusqu'à ce que la coalescence se produise. Cependant la variation de la forme des cristallites d'un grain à l'autre rend les comparaisons dimensionnelles difficiles.

6) le film amorphe se trouvant entre les cristallites continue à croître. Ainsi le contact entre le film amorphe et le métal est maintenu dans ces régions.

7) le film amorphe existant sur le sommet des cristallites ne continue pas à augmenter.

La densité de l'alumine Al_2O_3 est de 3,6 g/cm^3, la croissance des cristallites dans le métal s'accompagne d'une augmentation de volume de 40%. La figure ci-dessous montre la coupe d'un cristallite.

Les résultats expérimentaux présentés par les auteurs permettent de voir l'influence de la température sur l'oxydation thermique de l'aluminium (Fig.124)



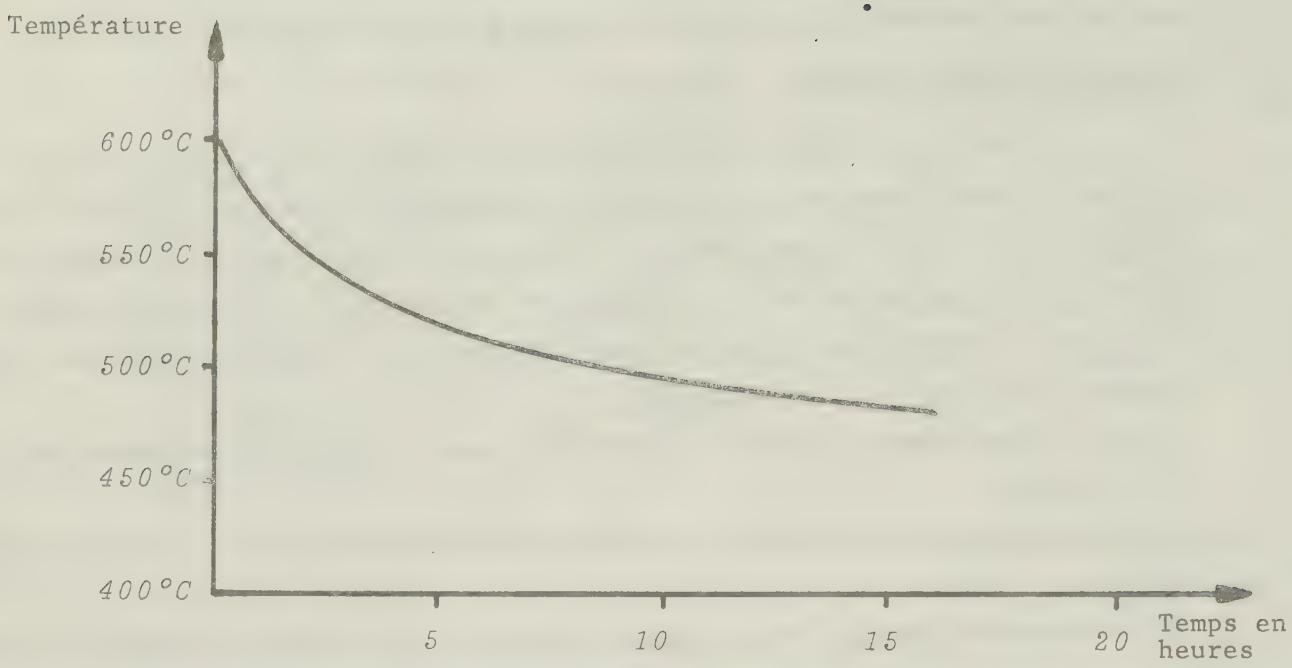


Fig. 124

En ordonnée on indique la température à laquelle est porté l'échantillon. En abscisse la durée nécessaire pour que le gain de poids de l'éprouvette soit de 2 ugm/cm^2.

HART et MAURIN (1969)

Une feuille mince d'aluminium est placée dans un microscope électronique et on suit son oxydation lorsque la température se trouve dans le domaine de température allant de 350° C à 540° C.

Quand on observe le processus de croissance on peut distinguer quatre périodes :

1) induction
2) nucléation
3) croissance des grains
4) coalescence et formation d'un film continu.

1) INDUCTION

Définie comme la durée nécessaire pour que dans les conditions d'expérience (G = 20 000) les grains d'alumine cristallisée deviennent visibles. La période d'induction paraît beaucoup plus sensible à la variable température qu'à la variable pression, comme le montrent les résultats donnés sur la figure 125.

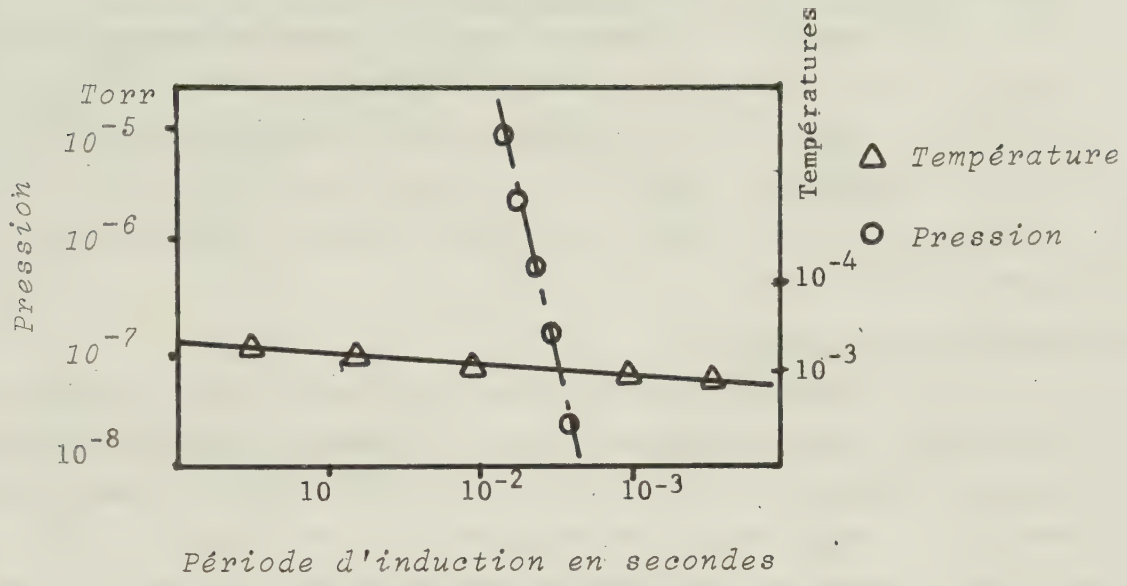


Fig 125

le peu d'influence de la pression montre qu'on ne peut expliquer la période d'induction par la chimie-sorption d'un film monomoléculaire d'oxygène.

2) NUCLEATION

Le plus petit grain discernable au microscope électronique ne peut être considéré strictement comme un nucléus car ce terme définit le plus petit groupe de molécules d'une nouvelle phase capable de se maintenir en équilibre instable avec son environnement. La densité de nucléi est pratiquement indépendante de la température et de la pression sur les plans(110) ceci est en accord avec les résultats d'autres auteurs.

On observe ainsi une nucléation secondaire apparaissant après la nucléation primaire, ces petits grains s'accroissent rapidement et aident à remplir les espaces laissés libres par la nucléation primaire.

c) Remarques au sujet de la morphologie des grains d'oxyde.

Bien que la croissance des grains soit tridimensionnelle, la croissance latérale est plus grande que la croissance en pénétration dans le métal. Ces grains semblent atteindre rapidement une épaisseur de 200 Å qui semble insensible aux changements de température et de pression, mais à la frontière de 2 grains on constate la pénétration de l'oxyde cristallisé jusqu'à une distance de 1000 Å à l'intérieur du métal. La surface extérieure du grain ne semble pas se modifier au cours de la croissance.

3a) Croissance des grains à pression constante.

Dans les conditions d'expérience on constate une période de croissance linéaire, suivie d'une période de croissance parabolique.

3b Croissance des grains à température constante.

En étudiant la croissance linéaire à une température de 440° C on observe qu'elle croît de 21 % lorsque la pression passe de 10^{-8} à 10^{-4} torr. Ceci est en accord avec les résultats trouvés précédemment par TRILLAT, TERTIAN et BONNET-GROS [182]. Ils ont montré que sous un vide de 10^{-5} torr l'oxydation est très ralentie par rapport à ce que l'on observe sous une pression de 10^{-3} torr.

4 Coalescence des grains.

La formation d'un film cristallin continu n'est pas nécessairement le résultat d'un accroissement des grains jusqu'à ce qu'ils se touchent le processus existe, mais la croissance des grains s'arrête souvent avant la jonction. Le remplissage entre deux grains est dû à deux processus, le premier est la création d'une deuxième génération de grains qui croissent jusqu'au 15ème de la taille des grains existants, le second est la croissance accélérée selon certaines directions cristallographiques en référence au réseau du métal.

DISCUSSION -

L'influence de ce film amorphe sur la croissance des grains est de modifier le taux de réaction en contrôlant l'oxygène parvenant aux points de réaction. La façon dont l'oxygène est transporté à travers le film superficiel n'a pas été précisée. Cependant la présence d'une croissance linéaire suggère un mécanisme faisant intervenir la vitesse de dissociation du gaz à l'interface gaz oxyde et la diffusion des ions oxygène et d'électrons fournis par la dissociation du réseau cristallin.

La formation d'une seconde génération de grains arrive préférentiellement quand les grains primaires provoquent des fissures dans le film superficiel.

Annexe 2 - Valeurs numériques des coefficients de frottement dans différentes conditions expérimentales.

N° des passages	Tournage et polissage mécanique recuit 75 mn	Polissage papier 220 dans le sens du glissement	Poli alumine recuit 45 mn	Poli électrolytique au tampon
1	0,39	0,35	0,55	0,13
2	0,27	0,25	0,40	0,27
3	0,24	0,22	0,32	0,39
4	0,22	0,20	0,28	0,41
5	0,20	0,19	0,25	0,40
6	0,18	0,18	0,24	0,37
7	0,17	0,17	0,23	0,29
8	0,16	0,17	0,22	0,34
9	0,16	0,16	0,21	0,32
10	0,16	0,16	0,20	0,34
11	0,15	0,15	0,20	0,30
12	0,15	0,15	0,20	0,31
13	0,15	0,15	0,19	0,28
14	0,16	0,15	0,19	0,29
15	0,16	0,15	0,19	0,31
16	0,16	0,15	0,19	0,31
17	0,16	0,15	0,18	0,31
18	0,16	0,15	0,18	0,31
30	0,17	0,16	0,18	0,25
40	0,19	0,16	0,18	0,28
50	0,20	0,16	0,18	0,26
60	0,23	0,16	0,17	0,29
70	0,23	0,16	0,17	0,27
80	0,22	0,16	0,17	0,32
90	0,24	0,16	0,17	0,28
100	0,25	0,17	0,17	0,26

Tableau 18

C O E F F I C I E N T D E F R O T T E M E N T

Ech.	P \ N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	0,5	0,35	0,42	0,42	0,38	0,36	0,32	0,32	0,30	0,30	0,30	0,29	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
	1	0,6	0,46	0,41	0,37	0,33	0,31	0,29	0,28	0,27	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,24	0,24	0,23	0,23	0,23
	2	0,67	0,50	0,47	0,44	0,41	0,37	0,34	0,32	0,30	0,29	0,28	0,27	0,27	0,27	0,26	0,26	0,25	0,25	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
2	0,5	0,22	0,36	0,36	0,35	0,33	0,31	0,30	0,29	0,28	0,27	0,27	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
	1	0,49	0,49	0,45	0,40	0,36	0,32	0,30	0,28	0,27	0,25	0,25	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
	2	0,32	0,54	0,48	0,44	0,41	0,38	0,35	0,32	0,30	0,28	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25	0,24	0,24	0,24	0,23	0,23
3	0,5	0,17	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,26	0,28	0,27	0,27	0,27	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
	1	0,13	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,19	0,21	0,26	0,32	0,30	0,28	0,26	0,25	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
	2	0,21	0,35	0,40	0,41	0,40	0,38	0,35	0,32	0,28	0,25	0,25	0,23	0,25	0,24	0,24	0,23	0,22	0,23	0,22	0,22	0,23	0,23	0,22	0,21	0,21
4	0,5	0,15	0,16	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,19	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,23	0,24	0,24	0,24	0,24	0,26	0,28	0,29	0,29	0,29	0,29	0,28
	1	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,18	0,20	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23
	2	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,14	0,15	0,15	0,16	0,17	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,22	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,26
	4	0,13	0,13	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,20	0,21	0,23	0,25	0,27	0,27	0,29	0,28	0,27	0,27	0,28	0,24	0,24	0,25	0,23	0,30	0,70
5	0,5	0,17	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,18	0,20	0,21	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
	1	0,13	0,11	0,11	°,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,17	0,18	0,19	0,19	0,20	0,21	0,21	0,22	0,23	0,24	0,24
	2	0,13	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,17	0,19	0,20	0,20	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24
	4	0,16	0,12	0,12	0,13	0,18	0,22	0,25	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	0,28	0,28	0,27	0,26	0,26	0,26	0,25	0,24	0,23	0,22	0,22	0,22	0,22
	5	0,23	0,18	0,22	0,27	0,32	0,38	0,41	0,42	0,43																
6	0,5	0,20	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23
	1	0,15	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,18	0,19	0,19	0,20
	2	0,14	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16
	4	0,18	0,13	0,13	0,13	0,13	0,14	0,14	0,16	0,17	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25	0,24	0,23
	5	0,23	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,27	0,28	0,29	0,29

Tableau 20

C O E F F I C I E N T D E F R O T T E M E N T

Ech	P \ N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
7	0,5	0,27	0,20	0,18	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,15	0,14	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16
	I	0,22	0,15	0,14	0,14	0,15	0,14	0,14	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13	0,14	0,14
	2	0,20	0,13	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15
	4	0,23	0,18	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	0,21	0,22	0,23	0,23	0,23	0,22	0,22	0,22	0,22	0,21	0,20	0,19	0,19	0,19
8	0,5	0,33	0,24	0,20	0,18	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
	1	0,36	0,20	0,17	0,16	0,15	0,14	0,14	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,13	0,13	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12
	2	0,26	0,21	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,14	0,14	0,14
	4	0,30	0,20	0,18	0,17	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15

Tableau 21

Les conditions initiales sont données au paragraphe I - 2 - 1 - 2 page

Ech. Echantillons d'aluminium n° 1 8

P. Charge en da N

N. Nombre de rotations de l'échantillon d'aluminium

A \ N		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
sec	0,5	1,6	1,3	1,26	1,22	1,20	1,18	1,16	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,12	1,12	1,12	1,12	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
e.d.	0,2	1,7	1,75	1,18	1,08	1	0,95	0,87	0,82	0,80	0,78	0,75	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
e.d. +dose1	0,5	0,14	0,14	0,3	0,36	0,4	0,28	0,50	0,58	0,66	0,70	1,20	0,94	0,92	0,86	0,78	0,74	0,70	0,68	0,66	0,64	0,64	0,64	0,62	0,62	0,62
e.d. +dose2	1	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
	P	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Héxa-décène	0,5	0,20	0,16	0,16	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
	1	0,15	0,13	0,13	0,13	0,15	0,17	0,18	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13

Tableau 28

A : ambiance

P : charge en da N

N : nombre de rotations effectuées par l'échantillon d'aluminium

e. d.: eau distillée

e.d. + dose 1 : eau distillée + 0,01 % de teepol

e.d. + dose 2 : eau distillée + 10 % de teepol

Les conditions initiales sont données au paragraphe II

A	N \ P	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
H.V.	5	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16	0,17	0,17
	10	0,13	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,14	0,15	0,15	0,15	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,25	0,26	0,25
	20	0,14	0,13	0,14	0,15	0,16	0,19	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,28	0,29	0,29	0,26	0,26	0,25	0,24	0,24	0,24
	40	0,18	0,14	0,15	0,17	0,19	0,21	0,23	0,26	0,30	0,32	0,33	0,34	0,32	0,32	0,32	0,30	0,30	0,28	0,27	0,26	0,25	0,24	0,24	0,23	0,23
H.V. + 10^{-4} c.ol.	5	0,14	0,13	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
	10	0,13	0,11	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,17	0,15	0,15	0,16	0,14	0,13
	20	0,13	0,11	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,12	0,13	0,14	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,14	0,13	0,14	0,14	0,15	0,14	0,13	0,15	0,17
	40	0,17	0,12	0,12	0,13	0,14	0,15	0,15	0,15	0,16	0,15	0,16	0,16	0,16	0,17	0,18	0,17	0,16	0,17	0,17	0,18	0,17	0,15	0,15	0,17	0,19
H.V. + 10^{-3} .ol.	5	0,17	0,16	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
	10	0,13	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
	20	0,13	0,11	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
	40	0,16	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10
H.V. + 10^{-2} c.ol.	5	0,11	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06
	10	0,13	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	20	0,16	0,15	0,14	0,14	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10
	40	0,11	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08

Tableau 29

A : ambiance
P : charge en newtons
N : nombre de rotations

H.V. : huile de vaseline
ac.ol.: acide oléique

LISTE DES PLANCHES

1 Destruction par érosion d'un matériau fragile

2 Destruction par érosion d'un matériau ductile

3 Trace d'un déplacement préliminaire effectué sur une surface polycristalline de laiton α polie électrolytiquement

4 Fissuration de la surface d'un échantillon fragile par une sphère dure

5 Photographies du frotteur et de la piste d'aluminium utilisés sur le tribomètre rotatif

6 Photographie du tribomètre à mouvement rotatif équipé du dispositif porte-frotteur n° 1, et des appareillages constituant la chaine de mesure et d'analyse de la force de frottement et des accélérations du porte-frotteur

7 Histogrammes d'amplitude du coefficient de frottement correspondant aux différentes phases

8 Variation de la force de frottement et de l'accélération dans la direction $M''y$ en fonction du temps au cours de chaque phase

9 Histogrammes d'amplitude de l'accélération dans la direction $M''y$ pendant les différentes phases

10 Variation de la force de frottement et de l'accélération

11 Histogrammes d'amplitude de l'accélération dans la direction $M''z$ pendant les différentes phases

12 Variation de la force de frottement et de l'accélération dans la direction $M''x$ en fonction du temps au cours de chaque phase

13 Histogrammes d'amplitude de l'accélération $\ddot{M}x$ pendant les différentes phases

14 Evolution de l'histogramme d'amplitude de la force de frottement au cours des 8 premières rotations de l'échantillon d'aluminium

15 Photographies simultanés de f et $\ddot{y}$, $\ddot{y}$ et $\ddot{z}$; $\ddot{y}$ et $\ddot{x}$

16 Photographie d'un bord de trace après le premier passage

17 Photographies obtenues à partir de répliques par vernis Jacquet de l'échnatillon d'aluminium avant frottement et au cours des phases 1,2,3

18 Photographies des profilogrammes des traces de frottement après les phases 1, 2 et 3

19 Micrographies électroniques de la surface de l'échantillon d'aluminium avant frottement

20 Micrographies électroniques de la surface de l'échantillon d'aluminium après frottement phases 1 et 2

21 Micrographies électroniques de la surface de l'échantillon d'aluminium après frottement phase 3

22 Recristallisation de l'aluminium dans les traces de frottement

23 Photographies montrant l'état de surface du frotteur pendant la phase 1

24 Photographies de l'état de surface du frotteur, avant glissement et pendant la phase 2

25 Photographie de la surface du frotteur pendant la phase 3

26,27 Micrographies électroniques de l'oxyde d'aluminium

28 Etats de surface des échantillons d'aluminium N°1,2,3,4 après 60 passages sous une charge de 5N

29 Etats de surface des échantillons d'aluminium N° 5,6,7 8 après 60 passages sous une charge de 5N

30 Etats de surface des frotteurs après glissement sur les échantillons d'aluminium N° 1,2,3,4 sous une charge de 5N

31 Etats de surface des frotteurs après glissement sur les échantillons d'aluminium N° 5, 6, 7, 8 sous une charge de 5N

32 Effets des grains de carbure de l'acier 6-5-2 lors de glissement sur un échantillon d'aluminium

33 Photographies de la trace obtenue sous une charge de 40N en présence d'huile de Vaseline contenant 10^{-2} en volume d'acide oléique

L I S T E D E S F I G U R E S

1 Mesure à l'aide d'un usuromètre de la perte de masse d'un échantillon en fonction du temps

2 Schéma d'un patin plan glissant sur une glissière plane

3 Coupe schématique d'un matériau métallique usuel par un plan perpendiculaire à sa surface

4 Allure schématique des courbes d'évolution du coefficient de frottement de glissement en fonction du temps

5 Evolution de la perte de masse en fonction du temps

6 Contact de deux corps métalliques

7 Représentation schématique du mécanisme de formation d'arête rapportée en avant

8 Formation d'une arête rapportée en avant

9 Influence de la nature de la piste sur l'évolution de coefficient de frottement au cours du temps

10 Formation d'une arête rapportée en arrière du frotteur

11 Usure du frotteur

12 Grippage et destruction par glissement

13 Principe d'obtention d'un circuit ouvert et fermé

14 Raccourcissement d'un frotteur en fonction de la distance de glissement

15 Raccourcissement d'un frotteur en cuivre en fonction de la distance de glissement

16 Evolution de la perte de masse du frotteur en fonction de la distance de glissement

17 Evolution du quotient du taux d'usure en fonction de la pression

18 Schéma du contact sous faible charge région I (b) sous forte charge, région II

19 Cylindre de laiton glissant à sec dans l'air ambiant sur une surface d'acier

20 Perte de masse système frotteur, piste (or) en fonction de la charge

21 Usure du fer armco glissant contre lui-même en fonction de la vitesse

22 Evolution du taux d'usure en fonction de la charge,

23 Evolution des charges critiques P_1 et P_2 en fonction de la vitesse de glissement

24 Evolution du taux d'usure avec la vitesse à des températures ambiantes différentes

25 Evolution de la charge critique en fonction de la vitesse de glissement dans le cas de la fonte grise

26 Schéma de l'intéraction d'un lubrifiant avec une surface métallique

27 Surfaces de cadmium lubrifiées par l'acide palmitique

28 Evolution du coefficient de frottement en fonction du nombre total d'atomes de carbone dans une machine moléculaire

29 Evolution du coefficient de frottement en fonction du poids moléculaire pour différentes familles chimiques

30 Volume perdu en fonction du temps

31 Vitesse d'usure en fonction de la pression moyenne en présence d'un lubrifiant actif et non actif

32 Evolution de la solubilité du transfert et du frottement en fonction du pourcentage d'or dans l'argent

33 Evolution du coefficient de frottement et du taux d'usure en fonction de la température dans le cadre du Cobalt

34 Evolution du coefficient de frottement de frotteur en alliage cobalt-molybdène glissant sur des pistes de même matériaux à la température de 25°C

35 Evolution des quantités de particules libres et de particules transférées en fonction du temps

36 Evolution du taux d'usure en fonction de la charge lors du glissement dans l'air ambiant (courbe a) ou dans le vide partiel (courbe b)

37 Evolution de la quantité de matériau perdu sous forme de particules libres (-O-) et transféré

38 Evolution de l'activité des particules d'usure lorsqu'on remplace un frotteur actif par un frotteur inactif

39 Comparaison de la taille des jonctions, des particules transférées et des particules libres

40 - a) Schéma utilisé pour simuler l'action d'une particule abrasive

b) Forme de la pointe A C B = 90°

41 - Evolution de la section droite du sillon en fonction de l'angle d'attaque

42 - Principe du calcul donnant les formules de l'aire de la section droite A de la rayure.

43 - Courbe de distribution des angles d'attaque des particules d'un papier abrasif.

44 - Evolution de la perte de masse en fonction du diamètre moyen des particules abrasives

45 - Inclusion de débris d'usure entre les particules abrasives de petite taille (inférieure à 70µ).

46 - Evolution de la perte de masse de frotteurs en acier en fonction du diamètre moyen des particules abrasives pour des charges différentes comprises entre 0,5 et 6 da N

47 - Evolution de la perte de masse par abrasion en fonction de la distance d'abrasion en circuit ouvert

48 - Schéma de détérioration des particules abrasives sous l'effet des passages successifs sous le frotteur

49 - Evolution, en circuit fermé, de la perte de masse par abrasion en fonction du nombre de passages d'une zone du papier abrasif sous le frotteur

50 - Evolution de la perte de masse par abrasion en fonction de la charge

51 - Evolution en circuit ouvert de la perte de masse par abrasion pour différents métaux en fonction de la vitesse

52 - Evolution de la perte de masse par abrasion en fonction de l'humidité ambiante

53 - Evolution de la résistance à l'usure pour des métaux purs et un acier à 0,83% de C

54 - Evolution de la résistance à l'abrasion en fonction de la dureté

55 - Schéma d'enfoncement d'une particule dure dans une pièce dure et une pièce molle

56 - Evolution de la perte de masse par abrasion d'un frotteur en acier en fonction de la dureté de l'abrasif.

57 - Schéma illustrant le mode d'action d'une particule abrasive pendant le polissage

58 - Définition de l'angle d'attaque d'une particule érosive

59 - Evolution de la perte de volume par érosion en fonction de l'angle d'attaque

60 - Evolution de la perte de masse par érosion en fonction de l'angle d'attaque α (Echantillon d'aluminium - échantillon de verre)

61 - Evolution de la perte de masse par érosion en fonction de la taille des particules érosives

62 - Evolution de la perte de masse par érosion en fonction de la vitesse des particules érosives

63 - Evolution du volume enlevé par érosion en fonction de la dureté Vickers des métaux

64 - a) Schéma du contact Hertzien
b) Déformation plastique de l'échantillon

65 - Distribution des contraintes principales selon l'axe des z, point de cisaillement maximum

66 - Détérioration de la surface en fonction du rapport $\frac{h}{R}$

67 - Schéma de la fracture hertzienne dans le plan z,y

68 - Allure des isostatiques dans le cas où f = 0,1 et f = 0,5

69 - Forme des fissures superficielles en fonction de la valeur du coefficient de frottement

70 - Mode de propagation des fissures de fatigue sous la surface dans le cas du roulement

71 - Forme d'une écaille

72 - Emplacement hachuré des zones de transformation structurale dans le cas du roulement

73 - Déplacement des couches superficielles dans le cas du roulement sans glissement

74 - a) Aspérité unique déformable avant contact
b) après écrasement de l'aspérité

75 - Définition de $N_1 = \frac{L_1}{d} \times N$

76 - Evolution de la quantité de matière produite par corrosion
a) Quand il se forme un film protecteur
b) Quand le film de matériau produit par la corrosion ne protège pas la surface

77 - Evolution de l'épaisseur du film de matériau corrodé en fonction du temps
a) film fragile
b) film ductile

78 - Evolution du taux d'usure en fonction du temps
a) film fragile
b) film ductile

79 - Plans des éprouvettes du tribomètre rotatif

80 Schéma du tribomètre à mouvement rotatif dispositif porte frotteur n° 1

81 Schéma des càpteurs piézoélectriques

82 Courbe de densité de probabilité

83 Histogramme d'amplitude

84 Schéma du tribomètre à mouvement actif dispositif porte-frotteur N° 2

85 Schéma de la chaine de mesure du capteur de force à variation de mutuelle induction

86 Schéma du frictiographe à mouvement alternatif

87 Mesure de la résistance de contact

88 Montage pour polissage électrolytique des échantillons d'aluminium

89 Détermination des conditions de polissage électrolytique d'un métal

90 Variation du coefficient de frottement en fonction du nombre de passages d'un point du plan d'aluminium sous le frotteur

91 Allure générale de l'histogramme d'amplitude du coefficient de frottement

92 Histogramme d'amplitude du coefficient de frottement au cours des différentes phases

93 Histogramme d'amplitude de l'accélération du frotteur dans la direction de la vitesse de glissement

94 Traçé des courbes de vitesse de glissement au cours des trois phases

95 Variation de la vitesse de glissement au cours du temps

96 Représentation du mouvement du frotteur dans le plan $\dot{y}y$

97 Histogramme d'amplitude de l'accélération du frotteur dans la direction perpendiculaire à la surface de l'échantillon d'aluminium

98 Histogramme d'amplitude de l'accélération du frotteur dans la direction perpendiculaire à celle du glissement et de la surface de l'échantillon d'aluminium

99 Traçé des courbes montrant l'évolution des accélérations des vitesses et des déplacements au cours du temps

100 Déplacement du frotteur dans la direction M"x

101 Remontée du frotteur pendant le glissement saccadé

102 Evolution du coefficient de frottement et de la résistance du contact au cours du temps

103 Evolution de la résistance de contact au cours d'un passage du frotteur en acier sur l'échantillon d'aluminium

104 Disposition des zones de mesures de microduretés

105 Disposition des séries de mesures de microdureté

106 Microdureté en fonction de la distance du centre de l'empreinte au milieu de la trace

107 Grosseur de grain après recristallisation en fonction de l'écrouissage

108 Evolution de la grosseur du grain après recristallisation en fonction du nombre de passages d'un point de l'échantillon d'aluminium sous le frotteur en acier

109 Evolution du coefficient de frottement en fonction des passages successifs d'un point de l'échantillon sous le frotteur

110 Gain en poids en fonction du temps d'échantillon d'aluminium ayant subi différents processus de préparation des surfaces

111-1 à 5 Evolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de passages

112 Evolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de passages d'un point de l'échantillon d'aluminium sous le frotteur

113 Evolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de passages dans le cas d'échantillons d'aluminium oxydés par voie anodique

114 Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps dans le cas d'échantillons d'aluminium de grande pureté

115 Evolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de passages dans le cas de frotteurs de nature métallurgique différentes

116 Evolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de passages

117 Evolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de passages

118 Evolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de passages

119 Evolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de passages

120 Evolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de passages dans le cas de deux esters de synthèse

121 Evolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de passages dans le cas du glissement en présence d'eau sur un échantillon d'aluminium fortement oxydé

122-1 Evolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de passages

122-2 Evolution de la résistance de contact en fonction du nombre de passages

123 Schéma d'enlèvement d'une pellicule d'oxyde

124 Courbe reliant la température et la durée d'oxydation nécessaires pour obtenir un gain de poids de 2 µgm/cm^2

125 Période d'induction en fonction de la température et de la pression

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1 Glossaire des termes et définitions dans le domaine du frottement, de l'usure et de la lubrification (Tribologie)
Groupe de recherches sur l'usure des matériaux industriels -
Organisation de coopération et de développements économiques
p. 68 n° 460

2 Lubrication (Tribologie) Education and research. A report on the present position and industry's needs - Department of education and science - London Her Majesty Stationery office - 1966 p. 2

3 M.D. ROGERS
The use of copper to prevent scruffing in diesel engines
Wear, Vol. 22 n° 2 Nov. 1972 p. 245 - 258

4 A. MARCELIN
La théorie physicochimique du frottement, de l'usure et de la lubrification
Revue du GAMI n° 4, Juillet - Aout 1958 p. 10

5 J. L. E. GROFF
A.B.C. du graissage p. 275

6 G. BELLANGER
Le frottement et l'usure à sec en relation avec les propriétés physiques et chimiques des couches superficielles sous jacentes - Revue de l'Institut français du pétrole - XV, n° 2, Février 1960, p. 417

7 R. COURTEL
Théorie du frottement
La Machine Outil Française, Octobre 1963

8 J. MASSOT
Méthode expérimentale de résolution d'un problème de frottement
GAMI, Janvier - Février 1965, n° 1

9 J. BLOUET
Tribométrie
Numéro spécial GAMI sur le frottement et l'usure, des Journées d'Etudes des 5 et 6 Décembre 1966

10 J.T. BURWELL
Survey of possible wear mechanisms
Wear, vol. 1, n° 2, 1957, p. 119 - 141

11 M.C. SHAW
Fundamentals of wear
CIRP, Volume 19, n° 3, Juin 1971, p. 533 - 543

12 R. COURTEL - J. BLOUET
Problèmes industriels des surfaces techniques. Cycles d'études supérieures de mécanique industrielle, p. 2 - I.S.M.C.M., Février 1971

13 BLOK
Education in lubrication and wear and its conceptual integration into machine design. The Institution of mechanical Engineers
Proceedings 1967 - 1968, Vol. 182, Part. 3 A, p. 18

14 P. NICOLAU
Position du problème de la définition et de la qualification des irrégularités géométriques des surfaces techniques. Journées d'etudes GAMI sur les irrégularités géométriques des surf. tech. 9, 10 et 11 Mai 1962

15 E. RABINOWICZ
Friction and wear of materials
Edit. John Wiley and Sons, Inc. New-York - London - Sydney p. 71

16 CABANNES
Mécanique générale
Dunod Editeur

17 J. BLOUET, R. GRAS, D. ARNAUD, R. COURTEL
Essais d'usure des bronzes
Extrait de Mécanique Matériaux Electricité - Usure Tome 2

18 F.P. BOWDEN et D. TABOR
The friction and lubrication of solids, 1950, p. 107

19 KRAGELSKI
Référence 15, p. 209

20 R. COURTEL
Sur l'observation de certains dommages périodiques causés aux surfaces par le frottement et leur interprétation
C.R.A.S. Paris, T. 253, Octobre 1961, p. 1758

21 D. M. TOLSTOI
Significance of the normal degree of friction and natural normal vibrations in contact friction
Wear, 10, 1967, p. 199 - 213

22 R. COURTEL
Vibrations normales aux surfaces causées par le frottement sur les métaux à sec - Rôle du bourrelet frontal
Métaux - corrosion - industrie, n° 473 - 474, Janvier - Février 1965, p. 1 à 39

23 R. BAGLIN et R. COURTEL
Sur l'analyse des vibrations normales et tangentielles aux surfaces, lors du frottement
C.R.A.S. Paris, Mars 1968, T. 266 S. A., p. 1083 - 1085

24 R. BAGLIN, P. ROUGIER et R. COURTEL
Sur la rigidité de contact entre deux surfaces solides et son rôle dans le frottement en présence de vibrations
C.R.A.S. Paris, Mars 1969, T. 268, S.A. p. 666 - 669

25 BOWDEN et LEBEN
Proceedings of the royal society of London
Vol. 1969, n° 56, 1938, p. 371 - 391

26 BLOK
The flash temperature concept
Wear, 1963, p. 483 - 494

27 JAEGER
Moving sources of heat and temperature at sliding contacts
Proceedings Royal Society N. S. N. 1942, n° 76, p. 203 - 224

28 LING
On temperatures at the interfaces of bodies in sliding contact.
Proceedings of the 4 th U.S. National Congress of applied mechanics 1962

29 VERNOTTE
A propos d'une complication du partage de la chaleur entre corps frottants, cas des étendues inégales.
Compte-rendus 1256, p. 5006 - 5068, 1963

30 J. POMEY
Le frottement lubrifié sous conditions sévères
Revue de l'Institut Français du Pétrole - Juin 1957

31 J. THIERY
Quelques applications récentes des radiotracteurs à l'étude de l'usure
Revue du GAMI, n° 3 - Mai - Juin 1961

32 H. CHRISTENSEN
L'effet de l'usure modérée sur la topographie superficielle
Mécanique, Matériaux, Electricité, n° 265-1, p. 26 - 29

33 F.P. BOWDEN et D. TABOR
Mechanical wear, Burwell, American society for metals
Janvier 1950, Chap. VII, p. 117 - 120

34 F.P. BOWDEN et D. TABOR
The friction and lubrication of solids
Oxford, Clarendon Press , Edition 1954, p. 28 - 31

35 I.V. KRAGELSKI et N.B. DEMKIN
Contact area of rough surfaces
Wear 3, 1950, p. 170 - 187 (voir page 176)

36 A.H. UPPAL et S.D. PROBERT, T.R. THOMAS
The real area of contact between a rough and a flat surface
Wear 22, 1972, p. 163 - 183

37 Référence 34, page 90

38 M. ANTLER
Process of metal transfer and wear
Wear 7, 1964, p. 181 - 203

39 M. COCKS
Interaction of sliding metal surfaces
Journal of applied physics - Vol. 33, n° 7, Juillet 1962, p. 2152 - 2161

40 M. ANTLER
Wear friction, and electrical noise phenomena in severe sliding systems
A.S.L.E. Transactions, 5, 1962, p. 297 - 307

41 E. RABINOWICZ
Friction and wear of materials
Editeurs : Wiley and Sons, New-York, 1965, p. 148, 149, 150

42 F. JOVANE
Superplasticity - A contribution to innovation informing
Conference at the University of Strthclyde Glasgow, 6 et 8 Avril 1971

43 F.P. BOWDEN et G.W. ROWE
The adhesion of clean metals
Proc. Roy. Soc. (London) A 233, 1956, p. 429 - 442

44 S.B. AINBINDER et A.S. PRANCS
On the mechanism of the formation and destruction of adhesion junctions between bodies in frictionnal contact.
Wear 9, 1966, p. 206 - 227

45 R. GRAS
Aspects métallurgiques du frottement à haute température d'alliages de titane
D.E.A. PARIS VI, p.18, Juin 1971

46 TOSHIO SATA
Transcience of the state of wear by repeated rubbing
Wear 3, 1960, p. 104 - 113

47 R.H. BROWN et J.R. ARMAREGO
Some observations on the friction and wear of a hardened rider
Wear 6, 1963, p. 106 - 117 (Voir page 117)

48 J.T. BURWELL et C.D. STRANG
On the empirical law of adhesive wear
Journal of applied physics, Janvier 1952, Vol. 13, n° 1, p. 18 - 27

49 J.T. BURWELL et C.D. STRANG
Metallic wear
Proc. Roy. Soc. 1952, A. 212, p. 470 - 477

50 Référence 47, page 160

51 A.W. CROOK
Somes studies of wear and lubrication
Wear, Vol. 2, 1958, p. 371

52 MAILANDER R. et DIES K.
1943 - Arch. Eisenhütten week, 16 - 385

53 R.M. FARRELL et T.S. EYRE
The relationship between load and sliding distance in the initiation of mild wear in steels
Wear 15, 1970, p. 359 - 372 (voir page 365)

54 T.S. EYRE et D. MEYNARD
Surface aspects of unlubrificated metal to metal wear
Wear 18, 1971, p. 302

55 RAGNARD HOLM Electric contacts
H. GEBERS - Stockholm 1946, p. 215

56 J.F. ARCHARD
Contact of rubbing of flat surfaces
Journal of applied physics, 23, 1962, p. 18 - 28

57 W. HIRST et J.K. LANCASTER
Surface film formation and metallic wear
Journal of applied physics, Vol. 27, n° 9, Sept. 1956, p. 1057 - 1065

58 Référence 33, p. 38

59 I.V. KRAGELSKI
Friction and wear
London Butterworths, 1965, p. 91

60 N.C. WELSH
Frictionnal heating and its influence on the wear of steel
Journal of applied physics, Vol. 28, n° 9, Sept. 1957, p. 960 - 968

61 N.C. WELSH
The dry wear of steels. The general pattern of behaviour
Phil. Trans. Roy. Soc. London - Série A 257, 1965, p. 31 - 70 (Voir page 36)

62 T.S. EYRE et BAXTER
The formation of white layers at rubbing surfaces
Tribologie Déc. 1972, Vol. 5, n° 6, p. 256 - 261

63 J.K. LANCASTER
The formation of surface films at the transition between mild and severe wear
Proc. of the Roy. Soc. n° 1355, 11 juin 1963, Vol. 273, p. 473

64 E. RABINOWICZ
Friction and wear of metals
Metals engineering quanterly american society for metals, Mai 1967, p. 7

65 J. BLOUET
Essais de frottement dans le vide à haute température avec lubrification par du fluorure de calcium en couches vitrifiées par chauffage à haute fréquence
GAMI, Numéro spécial de 1967, Journées d'études des 5 et 6 Déc. 1966, p. 84

65bis L. GRÜNBERG
Proc. Phys. Soc. (London), B 66, 1953, P. 153

66 G.V. VINOGRADOV, V.V. ARBHAROVA, A.A. PETROV
Anti-wear and anti-friction properties of hydrocarbons under heavy loads
Wear, 4, 1961, p. 274 - 291

67 G.V. VINOGRADOV et PODOLSKY
Significance of oxidative process during boundery friction in hydrocarbon media
The institution of mechanical engineers, Proc. 1967 - 1968, Vol. 182
Part. 3 A, p. 429

68 F.V. VINOGRADOV, N.T. PAVLOVSKAYA PODOLSKY
Wear 6, 1963, p. 202 - 225

69 Paul WOOG
Contribution à l'étude du graissage
Onctuosité influences moléculaires
Delagrave 1926

70 J.J. TRILLAT
Rayons X et composés organiques à longue chaîne
Recherches spectrographiques sur leurs structures et leurs orientations
Thèse PARIS, 5 Mars 1926

71 J.J. TRILLAT
Moments électriques adsorption et lubrification
Mémorial des sciences physiques, Fascicule 36, 1938

72 M. GODET
L'apport hydrodynamique dans le frottement lubrifié
Thèse PARIS, Février 1967

73 R. OWENS et W.J. BARNES
A.S.L.E. Transactions, 10, 74, 84, 1967

74 J.J. TRILLAT et R. VAILLE
Recherches sur l'onctuosité des huiles minérales de graissage
Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences - L. 203, p. 159
séance du 15 Juillet 1936

75 J.J. TRILLAT et R. VAILLE
L'adsorption des huiles en relation avec le graissage
Journal de chimie physique, Tome 33, 1936, p. 742 à 758

76 J.J. TRILLAT et R. VAILLE
Une méthode de mesure de l'adsorption des huiles par les surfaces métalliques
Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences, Tome 202, p. 2134
séance du 29 juin 1936

77 F.P. BOWDEN et D. TABOR
The friction and lubrication of solids
Part.II, Oxford Clarendon Press, 1964, p. 368

78 Référence 41, page 370

79 F. GIOLITO
Modes d'action possibles des additifs contenus dans les lubrifiants vis à vis des phénomènes de lubrification
Aspect moderne de la lubrification CAST INSA - LYON 1972, p. 114

80 P.I. SANIN, E.S. SHEPELOVA, A.O. MANNICK, B.V. KLEIMENOV
Chemical modification of friction surfaces
Journal of basic engineering transaction of the ASME, Série D, Sept. 65
p. 771 - 777

81 P. DEYBER et M. GODET
La formation et l'élimination de films extrêmes pression dans la lubrification mixte - A paraître dans Mécanique Electricité

82 P.I. SANIN, E.S. SHEPELOVA, A.V. MANNICK , B.V. KLEIMENOV
Chemical modifications of friction surfaces
Journal of basic engineering transaction of the ASME, Série D, Sept. 65
p. 717 - 777

83 P.A. REHBINDER et E.D. SCUKIN
Les phénomènes de surfaces dans la déformation et la fracture des solides
Séminaire de Mécanique des Surfaces - ISMCM, 17, 18, 19 Mai 1971, p. 25

84 J. OSTROVOI, R. GRAS, J. BLOUET, D. MAUGIS, R. COURTEL
Contribution à l'étude du frottement du bronze sur l'acier en présence d'une sustance superficiellement active - A paraître dans la revue Mécanique Electricité

85 P.E. SHAW et E.W.L. LAVEY
Friction of dry solids in vacuo
Phil. mag. Séries 7, 10, p. 809 - 822, 1930

86 H. ERNST et E.M. MERCHANT
Surface friction of clean metals. A basic factor in the metal cutting process
Proc. spécial summer conf. Cambridge Mass. p. 76 - 101, 1940

87 L.F. COFFIN
A study of the sliding of metals with particular reference to atmosphere lubrication - Eng. 12 - 50 - 58, 1956

88 E. RABINOWICZ
The determination of the compatibility of metals trough static friction tests
ASLE Transactions, Vol. n° 3, Juillet 1971, p. 198 - 205

89 E. RABINOWICZ
The influence of compatibility on different tribological phenomenes
Vol. 14, n° 3, Juillet 1971, p. 206 - 212

90 R. GRAS
Compatibilité tribologique
Cycle CESMI, Problèmes industriels des surfaces techniques - Frottement et Usure des matériaux - Février 1971, p. 9

91 J.J. CAUBET et POLTI
Les traitements de surface contre l'usure
Durvel. p. 370, p. 167

92 R.F. TYLECOTE
The solid phase welding of metals
Arnold Londres, p. 67 - 68

93 A.W.J. DE GEE
The friction of gold-silver alliage against steel
Wear 8, 1965, p. 121 - 132 (Voir page 131)

94 D.H. BUCKLEY et R.L. JOHNSON
Friction and wear of hexagonal metals and alloys as related to structure and lattice parameters in vacuum to 10^{-10} mm mercury
Trans. American Society of lubrications engineers, Vol. 9, n° 2
Avril 1966, p. 221 - 235

95 E.E. BISSON
Various modes of wear and controlling factors. Evaluation of wear testing
American society of testing materials A.S.T.M. Lubrif. 23 - 28 Juin 1968
p. 7, 8, 9

96 A.L. SEMENOV et V.V. POZDNYAKOV
Methods and results of a study on the friction and the adhesion between metals at elevated temperatures in vacuo and in gazas, p. 110 - 117 (Voir page 113)
Academy of Sciences of the USSA Structure and properties of heat resistant metals and alloye M.V. Pridensev Editor

97 M. KERRIDGE et J.K. LANCASTER
The stage in a process of severe metallic wear
Proc. Roy. Soc. A. 236, 1956, p. 250 - 265

98 M. KERRIDGE
Metal transfer and the wear process
Proc. Phus. Soc., B. 68, p. 400 - 408

99 Glossaire des termes et définitions dans le domaine du frottement, de l'usure et de la lubrification (Tribologie)
Groupe de recherche sur l'usure des matériaux industriels, Organisation de coopération et de développements économiques. Page 11, n° 12

100 D. TABOR
Hardness of metals
Oxford Clarendon Press 1951

101 T.O. MULHEARN et L.E. SAMUELS
The abrasion of metals. A model of the process
Wear, 5, 1962, p. 478 - 498

102 A.J. SEDRIKS et T.O. MULHEARN
Mechanics of cutting and rubbing in simulated abrasive processes
Wear 6, 1963, p. 457 - 466

103 M.E. MERCHANT
J. Appl. Phys. 16, 1945, 267

104 A.J. SEDRIKS et T.O. MULHEARN
The effect of work-hardening on the mechanisms of cutting in simulated abrasive processes
Wear 7, 1964, p. 451 - 459

105 J. GODDARD et H.WILMAN
A theory of friction and wear during the abrasion of metals
Wear 5, 1962, p. 114 - 135

106 J. LARSEN-BADSE
Influence of grit diameter and specimen size on wear during sliding abrasion
Wear 12, 1968, p. 35 - 53

107 J. LARSEN-BADSE
Influence of grit size on the groove formation during sliding abrasion
Wear 11, 1968, p. 213 - 223

108 G.K. NATHAN et J.D. JONES
The empirical relationship between abrasive wear and the applied conditions
Wear 9, 1966, p. 300 - 309

109 E. RABINOWICZ et A. MUTIS
Effect of abrasive particle size on wear
Wear 8, 1965, p. 381 - 390

110 E. RABINOWICZ
Friction and wear of materials
Wiley and sons, p. 179

111 E.F. FINKIN
Abrasive wear
Evaluation of wear testing
ASME - Symposium San Franscisco - 23, 28 Juin 1968

112 M.A. BABICHEV
Investigation of the abrasive wear of metals by the Brinell method
Friction and wear in machinery, Vol. 14, 1960, p. 1 - 29

113 Sir GEORGE BEILBY
Aggregation and flow solids
Macmillan 1921

114 F.P. BOWDEN et D. TABOR
The friction and lubrication of solids
Vol 1, Clarendon Press, Oxford 1950

115 E. RABONIWICZ
On the mechanism of polishing with abrasives
Wear 18, 1971, p. 169 - 170

116 R.L. AGHAN et L.E. SAMUELS
Mechanisms of abrasive polishing
Wear 16, 1970, p. 293 - 301

117 J.G.A. BITTER
A study of erosion phenomena - Wear 6, 1963, p. 1 - 4

118 J.G.A. BITTER
A study of erosion phenomena
Wear 6, 1963, p. 164 - 190

119 J.H. NEILSON et A. GILCHRIST
Erosion by a stream of solid particles
Wear II, 1968, p. 111 - 122

120 G.P. TILLY
Sand erosion of metals and plastics : A brief review
Wear 14, 1969, p. 241 - 248

121 G.P. TILLY et W. SAGE
The interaction of particle and material behaviour in erosion processes
Wear 16, Décembre 1970, p. 447 - 466

122 G.P. TILLY
A two stage mechanism of ductile erosion
Wear 23, Janvier 1973, p. 87 - 96

123 I. FINNIE
Some observations on the erosion of ductile metals
Wear 19, Janvier 1972, p. 81 - 90

124 G.P. TILLY
Erosion caused by airborne particules
Wear 14, Juillet 69, p. 63 - 79

125 I.V. KRAGELSKI
Friction and wear - London - Butterworth 1965, p. 117 - 125

126 I.V. KRAGELSKI
Trenie i izsnos - Moscou 1968

127 R.G. BAYER, W.C. CLINTON, C.W. NELSON, R.A. SCHUMACHER
Wear, Vol 5, p. 345 - 416, Septembre - Octobre 1962

128 BAYER, KU
Hand book of analytical design for wear
Plenum Press, New York, 1964

129 TABOR
The Hardness of metals - Clarendon Press Oxford

130 D. MAUGIS
Les contraintes hertziennes. Séminaire du laboratoire de mécanique des surfaces du C.N.R.S. Mars 1973

131 Référence 126, p. 24

132 R. COURTEL
Orientations actuelles des recherches dans le domaine du frottement
Le frottement et l'usure, n° Spécial G.A.M.I. 1967, p. 7

133 LAWN
Hertzian fractions in single cristals with diamond structures
Journal of applied physics, Vol. 39, n° 10, 1968, p. 4828 - 4836

134 GILROY, HIRST
British journal of applied physics (Journal physics D) Vol. 2, p. 1784 - 1969

135 D. TABOR
Les mécanismes de l'usure : un bref tour d'horizon
Mécanique Electricité n° 265 - 1

136 D. BERTHE, F. LAFONT, B. MICHAU
Les avaries dans le frottement lubrifié
Séminaire sur les aspects modernes de la lubrification
CAST Lyon INSA, 1972, p. 197 - 220

137 LAGARDE, DUPARQUET
Contribution à l'étude du pitting
Journal de la S.I.A. - Juillet 1965

138 CHABERT, RAMOND, LEBOURIE
Les engrenages
Journal de la S.I.A., Novembre 1971

139 D.W. REICHARD, R.J. PARKER, E.V. ZARETSKY
Residual stress and subsurface hardness changes induced during rolling contact
NASA Technical note D 4456, Avril 1968

140 H. MURO, N. TSUSHINA
Microstructural, microhardness and residual stress changes due to rolling contac
Wear 15, Mai 1970, p. 309 - 330

141 J. MONNOT, R.TRICOT, A. GUERRISSIER
Résistance à la fatigue et endurance des aciers pour roulements
Revue de métallurgie, Juillet Aout 1970, p. 619 - 638

142 G.H. YASILCA et V. RASZILLIER
A study of dark etching area (D.E.A.) type structure modification of material and hertzian contact area induced by ball bearing type motion
Wear 19, Janvier 1972, p. 1 - 15

143 L. VINCENT, B. COQUILLET, D. GUIRALDDENCQ
Etude de quelques types d'essais de roulements et tentative de simulation au moyen d'une machine de fatigue par contact bille - plan
A paraître dans Mécanique Electricité

144 G.M. HAMILTON
Plastic flow in rollers loaded above the yield point
Proceedings I.M.E. 1963, Vol. 177, n° 25

145 J.E. MERWIN, K.L. JOHNSON
Analysis of plastic deformation in rolling contact
Proceedings I.M.E. 1963, Vol. 177, n° 25

146 I.V. KRAGELSKI et E.F. NEPOMNYASHI
Fatigue wear under elastic conditions
Wear 8, 1965, p. 303 - 319

147 A. PALMGREN
Les roulements - description - théorie - applications - S.K.F.

148 I.V. KRAGELSKI, E.NEPOMNYASHI, G. KHARATESH
Proceedings I.M.E. 1967 - 1968, Vol. 182, Part. 3A
Lubrication and wear : Fondamentals and application to design

149 I.V. KRAGELSKI
Trenie i Iznos, Moscou 1968

150 R.G. BAYER, W.C. CLINTON, J.L. SIRICO
A note on the application of the stress dependency of wear in the wear analysis of an electrical contact
Wear, Mai - Juin 1964

151 W.C. CLINTON, J.C. KU, R.A. SCHUMACHER
Extension of the engineering model for wear to plastics, sintered metals and plating
Wear, Vol 7, 1964, p. 354 - 367

152 R.G. BAYER
Prediction of wear in a sliding system
Wear, Vol. 11, n° 5, Mai 1968, p. 319

153 J. BLOUET
Sur le calcul de la resistance des matériaux à l'usure
Analyse des travaux de Bayer et Ku
Séminaire de mécanique des surfaces ISMCM, 14 - 10 - 1968
(Document non publié)

154 I.V. KRAGELSKI
Le calcul de l'usure
Mécanique Electricité n° 2651, p. 39 - 45

155 Glossaire de l'O.C.D.E. page 68

156 Rabinowicz page 187 à 190

157 Référence 120, p. 38

158 GREENWOOD J.A. et WILLIAMSON J.B.P.
The contact of nominaly flat surfaces (Inc. Second International conference on electrical contact, Austria) 1964, p. 300 - 319

159 P.K. GUNTER et N.H. COOK
Junction deformation models for asperites in sliding interaction
Wear 20, 1972, p. 73 - 87 (Voir page 74)

160 L. SCHERER
La détermination des états de surface
Société de publications mécaniques p. 79

161 A. VEN EFFENTERRE, P.A. JACQUET, E. MENCARELLI
Sur une méthode de réplique pour la micrographie optique et ses applications aux examens non destructifs
Note au C.R. Séance du 7 Mai 1956

162 J. OUDAR et J. PAIDASSI
L'oxydation des métaux, Tome II, Gauthier Villars, p. 303

164 Contrat C.E.A. - I.S.M.C.M. n° 48 - 18 H, Septembre 1962 à Décembre 1969

165 J. BLOUET
Tribométrie
Journées d'études du GAMI, 5 et 6 Septembre 1966, p. 9

166 R.I. SILIN et J.R. FREDERICK 1967
Instrumentation for the analysis of the profile of machined surfaces
Am. C.I.R.P. Vol. 15, n° 4, p. 295 - 300

167 J. PEKLENIK
New developments in surface characterization and measurements by means of random process analysis. The institution of mechanical engineers proceedings 1967 - 1968, Vol. 182, Part. 3 K - Properties and metrology of surfaces
p. 108 - 126

168 VINH et BONFILS
Traitements statistiques des mesures sur des systèmes complexes de vibrations. Applications à la Mécanique des surfaces et à la métrologie. Conférence MESUCORA 1966, p. 17 A 4/1 et 2

169 Ph. JACQUET
Electrolytic and chemical polishing
Met. Reviews, 1956, (2) 157

170 F.P. BOWDEN et D. TABOR
The friction and lubrication of solids
Oxford at the Clarendon Press, 1950, p. 27

171 Metals reference book volume 1, London Butterworths 1967, p. 320

172 B. DUBOIS
Travaux pratiques de métallurgie page 133
Centre de documentation universitaire

173 N. MINORSKY
Non linear oscillations
D. VAN NOSTRAND Company Inc. Princeton, New Jersey, p. 8 - 20

174 J.M. TATRAUX PARO
Etude théorique du bruit de frottement
Rapport C.N.R.S. Centre de Recherches Physiques de Marseille
1970, p. 8

174bis A. VAN EFFENTERRE, P.A. JACQUET, E. MENCARELLI
Sur une méthode de réplique pour la minographie optique et ses applications aux examens non destructifs
Note aux C.R. séance du 7 Mai 1956

175 N. NOMARSKY et .A.R. WEIL
Sur l'observation des figures de croissance des cristaux par les méthodes interférentielles à deux ondes
Bulletin de la société française de minéralogie et de cristallographie
Vol. 77, 1954, p. 840 - 868

176 P.J. RICHARDS
Review of methods of measurement and assessment of surface form and texture
The institution of mechanical engineers - Proceedings 1967 - 1968, Vol. 183
Part. 3 K, p. 461

177 A. VAN EFFENTERRE, P.A. JACQUET et E. MENCARELLI
Comptes rendus 242, 1956, p. 2355

178 M. BADIA et B. DENONNE
Comptes rendus Acad. Sc. Paris, Série C, 1972, p. 282

179 BÜCKLE
Essai de microdureté et ses applications
Publications scientifiques et techniques du Ministère de l'Air, 1960

180 HONEY COMBE
The plastic deformation of metals
Edward Arnold 1968

181 WERNICK et PINNER
Traitements de surface et finition de l'aluminium
Eyrolles, p. 56

182 J.J. TRILLAT, L. TERTIAN, M. BONNET-GROS
Etude par diffraction et microscopie électroniques de l'oxydation et de la carburation des films minces d'aluminium
Revue de l'aluminium, Octobre 1960, n° 280, p. 1115 - 1117

183 P.E. DOHERTY et R.S. DAVIS
Direct observation of the oxidation of aluminium single crystals surfaces
Journal of applied physics, Vol. 34, n° 3, Mars 1963

184 P.E. DOHERTY
Direct observation of the oxidation of aluminium single crystal surfaces
Mémoires Scientifiques rev. Métallurgie LXII, 15 Mai 1965

185 M.J. DIGNAM et W.R. FAWCETT
The kinetics and mechanism of oxidation of superpurity of aluminium in dry oxygen, The Growth of crystallites of alumina
Journal of the Electrochemical Society, Vol. 113, n° 7

186 R.K. HART et J.K. MAURIN
The nucleation and growth of oxide islands on aluminium
Surface science 20, 1970, p. 285 - 303

187 P. LELONG, R. SEGOND et J. HERENGUEL
L'oxydation anodique de l'aluminium et de ses alliages, référence p. 389

188 W. THEELE
L'oxydation des bains d'aluminium et de ses alliages
Revue de l'aluminium, n° 11, Novembre 1962, p. 707 - 715

189 W. THEELE
L'oxydation des bains d'aluminium et de ses alliages
Revue de l'aluminium, n° 12, Décembre 1962, p. 780 - 786

190 Enquête CETIM 1972

191 L.P. TARASOV
Metals Handbook 8 th, Edition Vol. 1
Properties and selection of metals - American Society for metals, p. 247

192 J.J. TRILLAT
Adsorption moléculaire et états de surface en lubrification
Bulletin de l'A.F.T.P., 1er Juin 1948 - 69

193 L.E. StPIERRE, R.S. OWENS et R.V. KLINT
Chemical effects in the boundary lubrication of aluminium
Wear 9, 1966, p. 160 - 168

NOTATIONS

Ar : Aire réelle de contact entre solides

Aa : Aire apparente de contact entre solides

B : Coefficient numérique

C : Constante géométrique

HB : Dureté Brinell

E,E' : Modules de Young

J : Raideur des lames de mesure

L : Longueur de la grande surface

Ni : Nombre de rotations d'un roulement à billes

N : Nombre de passages d'un point de l'échantillon d'aluminium sous le frotteur

P : Charge

P^* : Charge critique

Re : Limite élastique en traction simple

$\vec{T}$: Force de frottement

$\vec{U}$: Vitesse de glissement

V, V_1 : Volumes usés

V' : Volume déformé

Wd : Energie critique nécessaire pour enlever une unité de masse par déformation.

Wc : Energie absorbée par la surface lorsqu'on veut enlever l'unité de masse par effet de coupe.

a : Rayon de contact hertzien

c : Coefficient numérique caractérisant le régime d'usure

d : Longueur de la petite surface

h : Enfoncement d'un frotteur sphérique dans le solide antagoniste

h' : Raccourcissement d'un frotteur conique

f : Coefficient de frottement

fs : Coefficient de frottement statique

fd : Coefficient de frottement dynamique

i, j : Angles de coupe

k : Probabilité pour qu'une jonction donne un débris d'usure

k' : Facteur de probabilité

p : Pression

pr : Préssion réelle

pa : Pression apparente

pm : Pression hertzienne moyenne

q	:	Nombre de sollicitations
t	:	Temps
x, y, z	:	Coordonnées du point de contact M dans un repère absolu M" x y z
$\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$	:	Accélérations du porte frotteur dans les directions M" x, M" y, M" z
Ul	:	Taux d'usure linéaire
Us	:	Usure spécifique
α	:	Angle d'attaque d'une particule
γ	:	Energie superficielle
ε_c	:	Allongement relatif en traction provoquant la rupture de l'échantillon
ε	:	Allongement relatif après q sollicitations
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	:	Contraintes principales
ν, ν'	:	Coefficient de Poisson
τ	:	Contrainte de cisaillement en surface

TABLE DES MATIERES

Pages

AVANT PROPOS .....

INTRODUCTION .....

PREMIERE PARTIE : GENERALITES CONCERNANT L'USURE

I - LES FACTEURS DE L'USURE 1

I-1 - Mode de contact 1

I-2 - Etat de surface microgéométrique 2

I-3 - Charge 3

I-4 - Vitesse 3

I-5 - Ambiance 3

I-6 - Nature des matériaux 3

II - LES EFFETS OBSERVABLES 4

II-1 - Résistance au déplacement 4

II-2 - Vibrations 6

II-3 - Phénomènes thermiques 6

II-4 - Transformations géométriques 6

II-5 - Transformations mécaniques et tribochimiques 6

II-6 - Variation de masse 7

II-7 - Conclusions 8

III - LES MECANISMES DE L'USURE 9

III-1 - Détérioration des surfaces par adhésion, usure adhésive 9

III-1-1 - Définition et principe 9

III-1-2 - Mode de contact 11

A) Influence de la dissymétrie sur la détérioration des oxydes

B) Comparaison entre glissement sur circuit ouvert et fermé selon que le frotteur est plus mou ou plus dur que la piste

III-1-3 - Influence de la charge 19

III-1-4 - Influence de la vitesse 24

III-1-5 - Influence combinée de la charge et de la vitesse 25

III-1-6 - Influence de l'ambiance 29

III-1-7 - Influence de la nature des matériaux 34

A) Solubilité

B) Structure cristalline

III-1-8 - Production des particules d'usure libre ... 38

A) Oxydation

B) Fatigue

III-1-9 - Conclusions 42

III-2 - Usure abrasive 43

III-2-1 - Définition et principe 43

III-2-2 - Effet de l'orientation géométrique des particules abrasives 43

III-2-3 - Effet de la taille des particules abrasives 45

III-2-4 - Comparaison entre l'abrasion en circuit ouvert et fermé 47

III-2-5 - Influence de la charge 48

III-2-6 - Influence de la vitesse 49

III-2-7 - Influence de l'ambiance 50

III-2-8 - Influence de la nature des matériaux 51

A) Métaux abrasés

B) Dureté de l'abrasif

III-2-9 - Remarque concernant le polissage 54

III-2-10- Conclusions 55

III-3 - Usure érosive 56

III-3-1 - Définition et principe 56

III-3-2 - Influence de l'angle d'attaque 56

III-3-3 - Influence de la taille des particules érosives 58

III-3-4 - Influence de la vitesse 59

III-3-5 - Influence de la nature des matériaux 60

III-3-6 - Conclusions 61

III-4 - Détérioration des surfaces par des surcharges usure par fatigue 62

III-4-1 - Détérioration par surcharges 62

A) Matériaux ductiles

B) Matériaux fragiles

III-4-2 - Usure par fatigue dans le cas du roulement 66
A) Fissures et écailles
B) Changements de structure métallurgique
C) Déplacement des couches superficielles
D) Durée de vie des roulements

III-4-3 - Usure par fatigue dans le cas du glissement 69
A) Principe de la méthode Kragelski
B) Critère de Bayer et autres
C) Remarques

III-5 - Usure corrosive 73

IV - CONCLUSIONS : CHOIX DES CONDITIONS EXPERIMENTALES DE NOTRE ETUDE 75

IV-1 - Les facteurs de l'usure 75
IV-1-1 - Mode de contact 75
IV-1-2 - Etat de surface microgéométrique 76
IV-1-3 - Charge 76
IV-1-4 - Vitesse 76
IV-1-5 - Ambiance 76
IV-1-6 - Nature des matériaux 77
IV-1-7 - Tableau 78
IV-2 - Les effets observés 79
IV-2-1 - Résistance au déplacement 79
IV-2-2 - Vibrations 79
IV-2-3 - Phénomènes thermiques 79
IV-2-4 - Transformations géométriques 79
IV-2-5 - Transformations mécaniques et physiques 80
IV-2-6 - Variation de masse 80

DEUXIEME PARTIE : METHODES EXPERIMENTALES

I - TRIBOMETRE A MOUVEMENT ROTATIF..... 81
I-2 - Formes et dimensions des échantillons 81
I-2 - Entrainement de l'échantillon d'aluminium 83
I-3 - Description du dispositif expérimental n° 1 83
I-4 - Mesure de la force de frottement 83
I-5 - Mesure et enregistrement des accélérations 85
I-6 - Calculateur logique numérique, étalonnage 86

I-7 - Description du dispositif expérimental n° 2 90

I-8 - Mesure de la force de frottement 92

II - TRIBOMETRE A MOUVEMENT ALTERNATIF 94

II-1 - Formes et dimensions des échantillons 94

II-2 - Description et fonctionnement du tribomètre à mouvement alternatif 94

II-3 - Chaine de mesure de la force de frottement 94

II-4 - Mesure de la résistance de contact 96

III - PREPARATION DES SURFACES 96

III-1 - Préparation des surfaces des échantillons d'aluminium 96

III-1-1 - Usinage 97

III-1-2 - Nettoyage des surfaces 99

III-1-3 - Traitement thermique 100

III-2 - Préparation des surfaces des frotteurs en acier 100

III-2-1 - Elaboration 100

III-2-2 - Nettoyage 100

IV - MODE OPERATOIRE 100

TROISIEME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE DE L'USURE DE L'ALUMINIUM RECUIT

I - EXISTENCE DE TROIS PHASES SUCCESSIVES DANS LE FROTTEMENT DE L'ACIER SUR DE L'ALUMINIUM RECUIT, LUBRIFIE PAR DE L'HUILE DE L'HUILE DE VASELINE SURRAFINEE

I - CONDITIONS INITIALES 101

II - VARIATIONS DE LA FORCE DE FROTTEMENT AU COURS DU TEMPS. EXISTENCE DE TROIS PHASES 101

III -ETUDE DETAILLEE DE LA FORCE DE FROTTEMENT ET DES ACCELERATIONS DU PORTE FROTTEUR AU COURS DES DIFFERENTES PHASES 103

III-1 - Force de frottement 103

III-2 - Accélérations 105

III-2-1 - Accélération dans la direction de glissement. 106

III-2-1-a - Histogrammes d'amplitude 106

III-2-1-b - Etude de la vitesse de glissement 110

III-2-2 - Accélération dans la direction $\ddot{M}z$ 114

III-2-3 - Accélération dans la direction $\ddot{M}x$ 118

IV - ETUDE DETAILLEE DE LA FORCE DE FROTTEMENT ET DES ACCELERATIONS DU PORTE FROTTEUR AU COURS DES HUIT PREMIERES ROTATIONS DE L'ECHANTILLON D'ALUMINIUM..... 122

IV-1 - Etude de f ,$\ddot{y}$,$\ddot{z}$,$\ddot{x}$ au cours des huit premières rotations de l'échantillon d'aluminium 122

IV-2 - Etude des courbes x (t) et z (t) 127

V - ETUDES DES SURFACES DES ECHANTILLONS D'ALUMINIUM 131

V-1 - Répliques par vernis polymérisable à froid 131

V-2 - Profilogrammes 134

V-3 - Micrographies électroniques 136

V-4 - Résistance de contact 140

V-5 - Microduretés 143

V-6 - Recristallisation 149

V-7 - Ecrouissage de la piste 152

VI - L'ETAT DE SURFACE DU FROTTEUR 153

VII - EVOLUTION DE LA PURETE DU LUBRIFIANT 157

VIII - CORRESPONDANCE ENTRE LES PHASES SUCCESSIVES DU GRAPHE DE FROTTEMENT ET LES ENDOMMAGEMENTS SUBIS PAR LA SURFACE DE L'ECHANTILLON D'ALUMINIUM 157

VIII-1 - Conditions initiales 158

VIII-2 - Evolution du coefficient de frottement au cours du temps 158

VIII-2-1 - Surfaces préparées par tournage 158

VIII-2-2 - Surfaces préparées par polissage à l'alumine 161

VIII-3 - Discussion des résultats 163

IX - DISCUSSION GENERALE 164

CHAPITRE 2 - ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA NATURE DES SURFACES FROTTANTES SUR L'APPARITION DES DIFFERENTES PHASES DANS LE DIAGRAMME DE FROTTEMENT .

I - ETUDE DE L'INFLUENCE DE L'OXYDATION DE L'ECHANTILLON D'ALUMINIUM SUR L'APPARITION DES DIFFERENTES PHASES DANS LE DIAGRAMME DE FROTTEMENT 166

I-1 - Surfaces générées par des procédés variés puis oxydés thermiquement 166

I-1-1 - Conditions initiales 166

I-1-2 - Variation du coefficient de frottement au cours du temps 166

I-I-3 - Interprétation des résultats 168

I-2 - Surfaces préparées par polissage électrolytique en bain Jacquet puis oxydées 169

I-2-1 - Echantillons oxydés par voie thermique 169

I-2-1-1 - Préparation des surfaces 170

I-2-1-2 - Conditions initiales 173

I-2-1-3 - Variation du coefficient de frottement au cours du temps 173

I-2-1-4 - Résistance de contact 180

I-2-1-5 - Etude des états de surface des échantillons d'aluminium 181

I-2-1-6 - Etats de surface des frotteurs après frottement 184

I-2-1-7 - Interprétation des résultats 184

I-2-2 - Echantillons oxydés par voie anodique .....

I-2-2-1 - Préparation des surfaces 187

I-2-2-2 - Conditions initiales 187

I-2-2-3 - Variation du coefficient de frottement au cours du temps 188

I-2-2-4 - Discussion des résultats 190

I-3 - Conclusions

II - EXISTENCE DE TROIS PHASES SUCCESSIVES DANS LE DIAGRAMME DE FROTTEMENT DANS LE CAS D'ALUMINIUM DE GRANDE PURETE..... 190

II-1 - Conditions initiales 190

II-2 - Evolution du coefficient de frottement au cours du temps 191

II-3 - Discussion des résultats 191

III - INFLUENCE DE LA NATURE METALLURGIQUE DU FROTTEUR SUR L'APPARITION DES DIFFERENTES PHASES DANS LE DIAGRAMME DE FROTTEMENT.

III-1 - Conditions initiales 193

III-2 - Variation de la force de frottement au cours du temps 194

III-3 - Discussion des résultats 194

CHAPITRE III - ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA LUBRIFICATION SUR L'USURE DE L'ALUMINIUM RECUIT ET OXYDE THERMIQUEMENT

I - AMBIANCES ETUDIEES 197

II - CONDITIONS INITIALES 198

III - EVOLUTION DE LA FORCE DE FROTTEMENT AU COURS DU TEMPS 198

IV - MESURE DE LA LARGEUR DE TRACE EN FIN D'EXPERIENCE DANS LE CAS DES MELANGES LUBRIFIANTS CONTENANT DE L'HUILE DE VASELINE ET DE L'ACIDE OLEIQUE 203

V - COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS AVEC DEUX ESTERS DE SYNTHESE 206

VI - DISCUSSION - ETUDE DES RESULTATS OBTENUS SUR L'ALUMINIUM POLI ELECTROLYTIQUEMENT 209

CONCLUSIONS 212

ANNEXE 1 - BIBLIOGRAPHIE CONCERNANT L'OXYDATION THERMIQUE DE L'ALUMINIUM 214

ANNEXE 2 - VALEURS NUMERIQUES DU COEFFICIENT DE FROTTEMENT DANS DIFFERENTES CONDITIONS EXPERIMENTALES 219

LISTE DES PLANCHES 224

LISTE DES FIGURES 227

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE 236

NOTATIONS 256

TABLE DES MATIERES 258

ACADÉMIE DE PARIS

UNIVERSITÉ DE PARIS VI

4, Place Jussieu - 75230 PARIS-CEDEX 05

SERVICE DE LA SCOLARITE

Bureau des Enseignements du 3e cycle

TÉLÉPHONE 336-25-25 · 325-12-21

PERMIS D'IMPRIMER

DOCTORAT : D'ETAT

THESE DE : SCIENCES APPLIQUEES

NOM : Monsieur BLOUET

Prénoms : Jean-Marie

né le 31 Janvier 19 34 à Quimper Dépt : Sud-Finistère

1ère THESE : "Contribution à l'étude de l'évolution de l'usure dans le cas du frottement de certains métaux."

2e THESE (Propositions faites par l'Université) :

PRESIDENT.M.SIESTRUNCK

EXAMINATEURS.MM.SAPALY

COURTEL

TRILLAT

MARCELIN

ACADÉMIE DE PARIS UNIVERSITÉ PARIS VI

Vu et Approuvé

PARIS, le 17 Janvier 1974

Le Président

de l'Université de PARIS VI

Sc 3e c. 72-09